

# AEデータから推定される水圧破碎 における水の破碎効果

陳 渠<sup>1</sup>・石田 肇<sup>2</sup>・水田義明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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  
(〒755 宇部市常盤台 2557)

<sup>2</sup>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) (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (同上)

水圧破碎における破碎流体の存在が岩盤の破碎機構に与える影響を検討するため、破碎流体として水を用いる通常の水圧破碎と、破碎流体を用いずウレタン・スリーブを介して破碎孔に載荷する実験を行った。供試体には花崗岩を用い、破碎に伴うAEを測定した。その結果、AEのメカニズム解からみるかぎり、個々の微小破壊はいずれの場合もせん断型の破壊が卓越することがわかった。しかしウレタン・スリーブの場合には、亀裂が破碎孔周辺で徐々に逐次的に進展するのに対し、水圧破碎の場合には、亀裂が極めて短時間に急速に進展する傾向が顕著であった。これは発生した亀裂に破碎流体が浸入して亀裂先端を押し広げるためと思われ、この点に破碎流体の存在の影響が大きく表れていることが明らかとなった。

**Key Words:** *hydraulic fracturing, injected fluid, acoustic emission (AE)  
fault-plane solution, rock mechanics*

## 1. はじめに

日本は、面積の小さなこの国土に144個もの火山が分布する世界でも有数の火山国であり<sup>1)</sup>、地熱は日本に豊富に存在する貴重な国産エネルギー資源である。しかし、日本の地熱発電設備量は1995年3月現在で約37.7万kWであり、これは日本の総発電設備量のわずか0.17%にすぎない<sup>2)</sup>。これは従来の地熱発電が、天然に存在する地熱貯留層、すなわち、熱水や蒸気のたまり場に坑井を掘削し、自然に噴出してくる熱水を利用して発電を行う方式に限られているからである。この従来型の地熱発電方式では、地下貯留層にたまっている熱水に限りがあり、発電に必要とする量を得ることが困難な場合がある。これに対し、高温の岩盤に人工的に水を注水することができれば、開発可能な地熱エネルギーは飛躍的に拡大し、また地質の変化の激しい日本でも大規模な地熱開発が可能となる。

乾燥した高温の岩体に人工的な地熱貯留層を造成し、亀裂は引張破壊によって発生し、最小主応力に

し、地熱の抽出を行う発電方式は、高温岩体発電と呼ばれ、1970年代はじめに米国のロスアラモス国立研究所で考案された<sup>3), 4)</sup>。この方式は、地下の高温で透水性の低い岩盤に向けて坑井（注入井）を掘削し、この坑井に地表から高圧の水を圧入し、水圧破碎により岩盤内に人工的に亀裂を進展させ、地熱貯留層を造成する。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と、亀裂を流れる間に水は加熱され熱水となり、生産井から熱水と蒸気が回収される。

このような高温岩体発電システムでは地熱貯留層の造成が重要であり、その合理的な設計のためには、高圧の水を圧入して発生させる人工亀裂の生成メカニズムを明らかにしておく必要がある。水圧破碎による破壊メカニズムの研究は、Hubber and Willis<sup>5)</sup>から始まる。彼らは、ボアホール周辺の岩盤が不透水性で等方均質な弾性体であり、かつ、主応力の方向のひとつがボアホール軸と一致すると仮定した場合交する方向に形成されることを理論的に示した。

のことから、水圧破碎による亀裂発生時の圧力と亀裂の方向から岩盤内の応力を求める方法が開発され<sup>6), 7)</sup>、土木、石油、鉱山、地質物理などの分野で盛んに利用されている。しかしながら、今まで野外での水圧破碎実験で観測された 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。) に地震学的な手法を適用して岩盤の破壊メカニズムを調べると、深さ 10m の小規模なものから深さ 4000m 級の大規模なものに至るまで、観測された AE のほとんどは、理論的に予測される引張破壊ではなくせん断破壊によって生じたことが示されている<sup>8)-11)</sup>。このように理論から導かれる破壊メカニズムと AE の観測データから求まるメカニズムとは一致していない。この例からもわかるように、水圧破碎による人工亀裂の生成メカニズムには不明な点が多く残されている。

室内実験で AE 観測を行って水圧破碎のメカニズムを解明しようとする研究は、Lockner and Byerlee<sup>12)</sup>、Majer and Doe<sup>13)</sup>、佐々木ら<sup>14), 15)</sup>が行っている。Lockner and Byerlee<sup>12)</sup>は破碎流体の注入速度と破壊メカニズムの関係を議論しているが、AE データは震源決定だけに用い、破壊メカニズムは亀裂の方向や性状に基づいて検討している。Majer and Doe<sup>13)</sup>は直接録音方式のアナログ・レコーダーを用いて AE をべた取りし、AE の震源決定を行うとともに、初動部分のデータを用いて破壊メカニズムを論じている。しかしこの実験の場合、AE センサーが 5 個と少なく P 波初動の押し引き分布からメカニズム解を求めることは困難である。これらに対し佐々木ら<sup>14)</sup>は、多数のセンサーを用いて AE 観測を行い、観測した AE の P 波初動の押し引き分布からメカニズム解を求め、水圧破碎の破壊メカニズムの解明を試みている。彼らは、アクリル樹脂と花崗岩の立方体供試体に 16 個のセンサーを設置して水圧破碎実験を行い、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た。そして、この違いが生じる原因として、花崗岩に含まれる微小亀裂の存在を指摘している。また彼らは、供試体に大理石や安山岩を用いた場合や、破碎流体に油を用いた実験を行い、岩種や破碎流体の違いが、水圧破碎の破壊メカニズムに及ぼす影響を検討している<sup>15)</sup>。

筆者らは、これらの従来の研究、特に佐々木らの研究成果を踏まえ、水圧破碎における破碎流体の存在そのものが岩盤の破壊メカニズムにどのような影響を与えるかを検討することにした。そこで、破碎流体を用いない破碎試験として、ウレタンを介して破碎孔の孔壁に圧力を作用させる試験を行い、これ

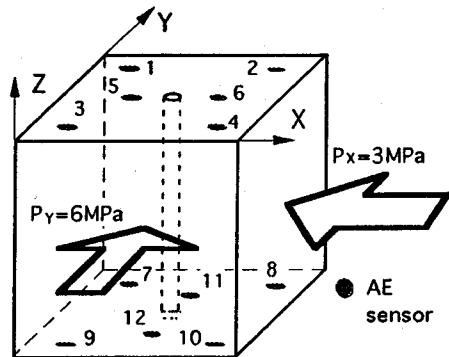


図-1 供試体の載荷状態及び供試体に設置した AE センサーの位置

を通常の水圧破碎の場合と比較した。供試体には花崗岩を用い、破碎メカニズムの観測には、AE の測定を用いた。その結果、いくつかの興味ある知見が得られたので報告する。

## 2. 実験方法

### (1) 岩石供試体

すでに述べたように、実験は、水を破碎流体として用いて供試体を破碎する通常の水圧破碎実験と、破碎流体を用いずウレタン・スリープを介して破碎孔を加圧して供試体を破碎する実験の 2 種類を行った。いずれの実験の場合も、供試体には一辺 19cm の立方体形状の黒髪島花崗岩を用いた。

花崗岩の採石に際しては、まず最も割れやすい石目に沿ってくさびを入れ亀裂を生じさせるのが普通であり、この石目の方向は異方性の主軸に一致していることが多い。また、2番目3番目に割れやすい面も互いに直交し、これらも異方性の主軸に一致しているのが普通である<sup>16)</sup>。今回の実験に用いた供試体は、採石場からこのようにして切りだした岩塊から、さらにもう一度同じ方法で小割し、これらの面に沿って整形したものである。したがって、異方性の主軸は供試体の各面に平行、すなわち、図-1 のように座標系を定めた場合、X、Y、Z の 3 方向に概ね一致していると思われる。そこで、実験前に、これら 3 方向の P 波伝播速度の測定を行った。水圧破碎実験に用いた供試体の P 波速度は X 方向が 4.93km/s、Y 方向が 5.14km/s、Z 方向が 5.20km/s であった。また、ウレタン・スリープによる破碎実験の供試体の P 波速度は X 方向が 4.98km/s、Y 方向が 5.16km/s、Z 方向が 5.27km/s であった。供試体の中心に P 波速度が最大である Z 方向に直径 20mm の

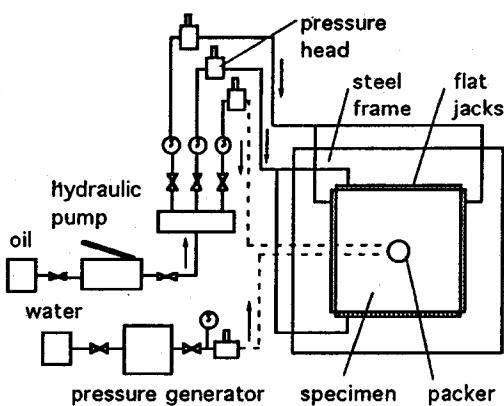


図-2 実験装置の模式図

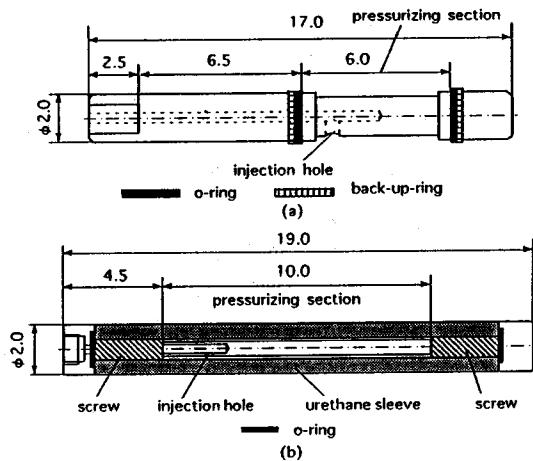


図-3 実験に使用したパッカー (a) 水圧破碎用のダブル・パッカー (b) ウレタン・スリーブによる載荷に使用したウレタン・パッカー (単位: cm)

破碎孔を削孔した。

供試体への拘束圧は、X 方向に 3MPa, Y 方向に 6MPa を載荷し、この 2 軸応力状態の下で実験を実施した。弾性論によれば、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 3MPa (孔壁上の Y 座標最大及び最小の点)、最大で 15MPa (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て、この載荷条件を選んだ。

## (2) 供試体の破碎方法

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。図中の破線は破碎孔への載荷管路を示す。

水による破碎の場合には、図-3(a)に示すようなメカニカル・タイプのダブル・パッカーを用いた。この場合、2 つの O リングで区切られた 6.0cm が加圧区間となり、この間では、供試体の破碎孔壁面に直接水圧が作用する。水圧の加圧には、プレッシャー・ジェネレーターを使用し、1 分間当たり約 10cm<sup>3</sup> の流量で加圧した。プレッシャー・ジェネレーターは、このような小さな流量で圧力の脈動が小さい安定した加圧ができる点に特徴がある。また、発生した亀裂面が実験後観察しやすいよう、水には水性の赤ペイントを混ぜた。

ウレタン・スリーブによる破碎の場合には、図-3(b)に示すようなウレタン・パッカーを用いた。ウレタン・パッカーの内圧の加圧には油を用い、ハンド・ポンプで加圧した。この場合、油圧はウレタン・スリーブの内側に作用する。このため、図中の 10.0cm の間で、供試体の破碎孔壁面に、ウレタン・スリーブを介して圧力が作用する。

いずれの実験においても、破碎実験終了後、供試体表面で亀裂の観察を行った。また、破碎孔周辺の亀裂の発生を観察するため、水圧破碎孔を中心として、直径約 7cm のオーバー・コアリングを行い、採取したコアの表面で亀裂を観察した。

水圧またはウレタン・パッカーの内圧の加圧は圧力計を目視で確認しながら行った。圧力値はプレッシャー・ジェネレーターまたはハンド・ポンプとパッカーの間に設置した圧力変換器で検出し、これを自動デジタル測定器で 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

水圧破碎では、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 に示すように収録用システムとは別に再生用システムが必要となつた。

収録用システムは図-4(a)に示すように、AE センサー、プリアンプ、シグナル・コンディショナー、トリガー・ボックス、レート・カウンタ、波形記憶装置、データ・レコーダーからなる。AE センサーには、共振周波数 150kHz、直径 17.4mm、厚さ 16.3mm

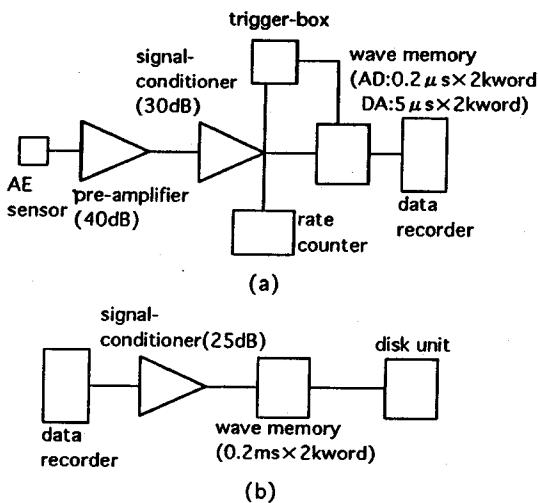


図-4 AE測定システム (a) 収録用システム  
(b)再生用システム

の円柱型センサー(Physical Acoustics Corporation 製, R15型)を用いた。このセンサー合計12個を、加熱して溶融させたワックス(エヌエフ回路設計ブロック製、商品名、エレクトロンワックス)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信号はプリアンプで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、アナログ・データ・レコーダー(XR510, TEAC製)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。データ・レコーダーはFM方式で、テープ速度は76cm/sとした。この速度でのデータ・レコーダーの測定帯域はDC~20kHzである。A/D, D/A変換により現象は25倍引き伸ばされているから、例えばセンサーの共振周波数150kHzの波動は6kHzとしてデータ・レコーダーに収録される。

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論理のトリガーロジックボックスを用い、図-1の1,6,10のいずれか1つのセンサーで一定レベル以上の振幅を感じ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、イベント計数法でAEの発生個数をカウントして記録した。

再生用システムは図-4(b)に示すように、データ・レコーダー、シグナル・コンディショナー、波形記憶装置、ディスク・ユニットからなる。実験終了後、この再生用システムを用い、以下の方法でAEデータを再生した。すなわち、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、GP-IBで転送して、フロッピードィスクに収録した。なお、再生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。

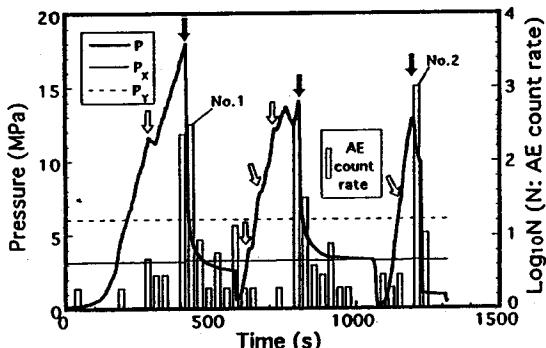
### 3. 実験結果と考察

#### (1) 圧力及びAE発生頻度の経時変化

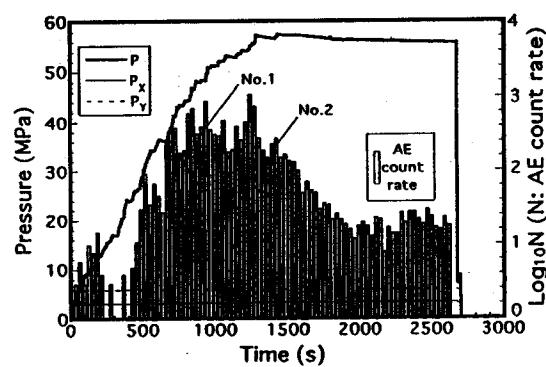
図-5は、水圧破碎の場合とウレタン・スリーブを用いた場合の圧力-時間曲線とAEの発生頻度を示す。

水圧破碎の実験では、加圧に用いたプレッシャー・ジェネ레이ターの容量が小さいため、一定量の送水の後に水の補充が必要になる。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る。図-5(a)の圧力-時間曲線に白矢印で示した圧力の低下は、これらの作業のために送水を中断したためである。圧力-時間曲線が滑らかでないのは、圧力計を目視しながら、手動でプレッシャー・ジェネ레이ターを制御したためである。この実験では、図に黒矢印で示したように3回の急激な圧力低下がみられる。なお、2つ目の黒矢印の直前にみられる圧力低下は送水の中止によるものではない。したがってこれは、供試体内部の微小亀裂の発生などによる、この直後に発生する2回目の急激な圧力低下の先行現象と思われる。以下では、加圧開始から黒矢印で示した急激な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ことにする。

1回目の加圧においては約17.9MPaで破碎(ブレーク・ダウン)が生じ、内圧が急激に低下した。後で示すように、亀裂は破碎孔から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、かつ供試体への流体の浸透がなければ、低下した圧力はX方向の側圧Pxに漸近するはずである。2回目の急激な圧力低



(a) 水圧破碎の場合



(b) ウレタン・スリープによる破碎の場合

図-5 圧力、AE 発生頻度と時間の関係 (No.1, No.2は図-13, 14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)

下の後には側圧  $P_x$  に漸近しているが、1回目と3回目の圧力低下の後には、圧力は側圧  $P_x$  を下回っていることがわかる。水圧破碎では亀裂がパッカーのOリング部分を越えて生じることがあり、破碎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。1回目と3回目の圧力低下の後に圧力が  $P_x$  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て漏水したためか、あるいは供試体内部への水の浸透ためではないかと思われる。

次に最大圧に着目すると、1回目の加圧では 17.9 MPa の最大圧を示したが、2回目の加圧では 14.0 MPa の値を、3回目の加圧では 12.8 MPa の値を示している。1回目の加圧で新たに亀裂を発生させるには、岩石の引張強度と生成する亀裂面に作用する直応力をの和を上回る水圧を作用させる必要がある。しかし、2回目の加圧ではすでに生じている亀裂面を開口させるだけで水圧の急激な低下が生じるから、亀裂面に作用する直応力を上回る大きさの水圧を作用させるだけでよい。したがって、1回目と2

回目の最大圧の差 3.9 MPa は、供試体岩石の引張強度に対応する<sup>17)</sup>。3回目が2回目より小さい理由はよくわからないが、2回目の破碎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のいずれかひとつのセンサーで検知されたAEイベント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、圧力が最大値を示す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。これは、水圧破碎による亀裂は、加圧の最大値から急激な低下に至る過程で、急激に発生あるいは進展し、他の時期にはほとんど発生あるいは進展していないことを示唆している。

ウレタン・スリープを用いた破碎実験の圧力-時間曲線(図-5(b))は、水圧破碎の場合に比べて、横軸の目盛を2倍、縦軸の目盛を3倍して表示している。この実験では、圧力計を目視しながらハンド・ポンプを用いて加圧したが、加圧開始から1428s経過したところで加圧しても圧力の上昇がみられなくなった。そこで、この時点の圧力 57.5 MPa を最大圧として、加圧を中止した。このため圧力はこの後徐々に低下し、実験を打ち切った2672sでは 55.7 MPa となった。なお、この図に示した圧力値は、ウレタン・パッカー内部に加圧した内圧の値である。図-3(b)に示したウレタン・パッカーの構造から容易にわかるように、供試体の孔壁に実際に作用する圧力値はこれより小さくなる。このようなウレタン・パッカーの実際の作用圧については、佐久間<sup>18)</sup>が検討を行っている。佐久間が示した式に、今回用いたパッカーの内外径、ウレタンの剛性、ポアソン比を代入すると、ここに示した圧力値の88%程度が供試体の孔壁に実際に作用していることになる。

さて、ウレタン・スリープを用いた破碎実験の圧力-時間曲線を、水圧破碎実験と比べたとき、ウレタン・スリープを用いた実験で急激な圧力低下が生じていない点に、まず大きな特徴が見られる。水圧破碎実験で見られる急激な圧力低下は、亀裂の発生とともに水が亀裂内に侵入するためである。この場合には亀裂の先端にまで水圧が作用するため、亀裂は急速に進展する。これに対し、ウレタン・スリープを介した載荷では、供試体に亀裂が発生してもウレタン・パッカー内部の流体はその内部にとどまり、亀裂に侵入しない。このため、圧力低下はあまり生じず、亀裂の進展もゆっくりとした逐次的破壊になる。

と思われる。もうひとつの顕著な特徴は、AEの発生頻度の時間的な分布である。ウレタン・スリーブを用いた破碎実験では、AEは全時間にわたってほぼ均等に発生している。少なくとも、水圧破碎の場合のように、亀裂の形成にともなって短時間に集中的に発生するという傾向はみられない。このように、圧力-時間曲線の形状の相違とAE発生頻度の時間的な分布の特徴の相違から、上述の亀裂発生形態の違い、すなわち、水圧破碎の場合には亀裂に水が浸入して短時間に急激に亀裂が成長するのに対し、ウレタン・スリーブの場合には破碎孔周辺で徐々に逐次的に亀裂が進展するという違いを反映していると考えられる。

## (2) AE震源の空間分布と供試体表面の亀裂

AEの震源は、各センサーへのP波初動の到達時刻から求めた<sup>10)</sup>。また、花崗岩供試体のX、Y、Z各方向でP波速度が異なるため、AEの震源決定はP波速度の異方性を考慮して行った<sup>19), 20)</sup>。

また、震源決定の精度向上をはかるため、以下の4条件をすべて満たして決定された震源のみを考察の対象とした。

- 1) センサー数(データ数)は6以上である。
- 2) 決定された震源は、供試体内部にある。
- 3) 走時残差の標準偏差は3μs以下である。
- 4) 走時残差の絶対値(|t<sub>i</sub>-T<sub>i</sub>|)の最大値は5μs以下である。なお、t<sub>i</sub>はi番目のセンサーへのP波初動到達時刻であり、T<sub>i</sub>は決定された震源座標と発生時刻から逆算されるP波初動到達時刻である。

これらの条件1) 2) を定めた理由は次の通りである。すなわち、1) については、震源決定の未知数は震源座標(X, Y, Z)と発生時刻の4つであり、最小二乗法を適用するには最低6個程度のデータがあることが望ましいと思われるためである。2) については、ここで考察の対象とするAEの発生は、供試体内部以外に考えられないためである。条件3) 4) については、実験に用いた立方体供試体の1辺の長さが19cmであり、議論を行うためには震源決定誤差が、その10%の19mm程度以下であることが必要と思われること。一方、供試体の弾性波速度は5km/s程度であり、条件3) 4) に定めた3μs及び5μsの間に弾性波が伝播する距離はそれぞれ15mm, 25mm程度であることから、これらの値がそれぞれ走時残差の標準偏差と走時残差の絶対値の最大値の目安になると思われたからである。なお、上記3) の基準に基づき、震源を仮定して各センサーへのP波の伝播時間を求め、これに各センサーの初動読み取り誤差として平均0、標準偏差3μsの乱数を加え、

乱数を加えた値を用いて震源を逆算した<sup>21)</sup>。いくつかの乱数の組合せに対するこの計算の結果、今回の実験における震源決定精度は数mm程度、最大でも20mm程度と推定され、条件3) が概ね適切な誤差範囲を与えていることを確認した。

水圧破碎の場合に発生したAEのうち、上記の1) ~4)の条件を満足して求まったAE震源は139個であった。震源を○印で図-6に示す。図中●に見える点は、○印が同一箇所に複数個重なりっているためである。震源分布はX-Y, X-Z及びY-Zの各断面に投影したものである。左上のX-Y平面図をみると、AE震源は水圧破碎孔から岩石供試体の両端面まで最大加圧方向(Y軸方向)に直線状に分布していることがわかる。また、X-Z断面図及びY-Z断面図より、震源はほぼ加圧区間(6.5cm < Z < 12.5cm)を中心に分布していることがわかる。したがって、亀裂は破碎孔の加圧区間から最大加圧方向に平面的に成長したと思われる。このことは、従来の水圧破碎理論から考えられる亀裂発生の方向と一致している。また、この実験で発生した亀裂の供試体表面での観察結果と破碎孔を中心にオーバー・コアリングしたコア表面での観察結果を図-7(a)(b)に示す。これをAE震源の空間分布と比較すると、AE震源は破碎孔からYの土両方向へほぼ同じ密度で分布しているが、可視亀裂はY=0の面だけで観察され、Y=19cmの面では観察されていない。しかし、この点を除けば両者はよい一致を示しているといえる。

ウレタン・スリーブを用いた破碎で発生した262個のAE震源の分布を図-8に示す。X-Y平面図をみると、震源は水圧破碎の場合と同様に最大加圧方向に分布することがわかる。しかし、水圧破碎の場合のように供試体の端面にまで震源が分布せず、破碎孔の周辺に集中的に分布する点が特徴的である。X-Z断面図、Y-Z断面図をみると、震源はボアホール軸を中心に供試体の上下の端面の近くまでZ軸方向に広く分布している。これは、水圧破碎の場合に、震源が加圧区間を中心にZ軸方向には限られた範囲に分布したのと対照的である。ウレタン・スリーブを用いた破碎の場合、加圧区間が10.0cmと水圧破碎の場合の6.0cmより長く、また亀裂発生後も加圧区間全体に分布荷重が作用することが、このようなZ方向の震源分布の違いが生じた原因ではないかと思われる。図-9にこの実験の亀裂の観察結果を示す。この図より供試体表面には顕著な亀裂は観察されなかつたが、破碎孔を中心にオーバー・コアリングしたコアの表面にははっきりと亀裂が認められることがわかる。これはAEの震源分布とよい一致を示して

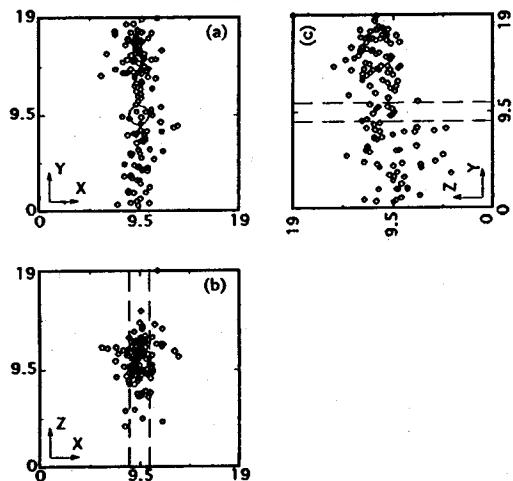


図-6 水圧破碎で発生した AE の震源分布

(a) XY 平面図 (b) XZ 断面図  
(c) YZ 断面図 (破線は破碎孔)

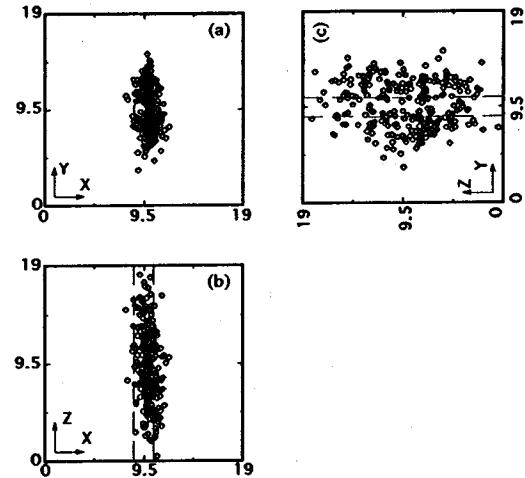


図-8 ウレタン・スリープを用いた破碎で発生した

AE の震源分布 (a) XY 平面図 (b) XZ 断面図  
(c) YZ 断面図 (破線は破碎孔)

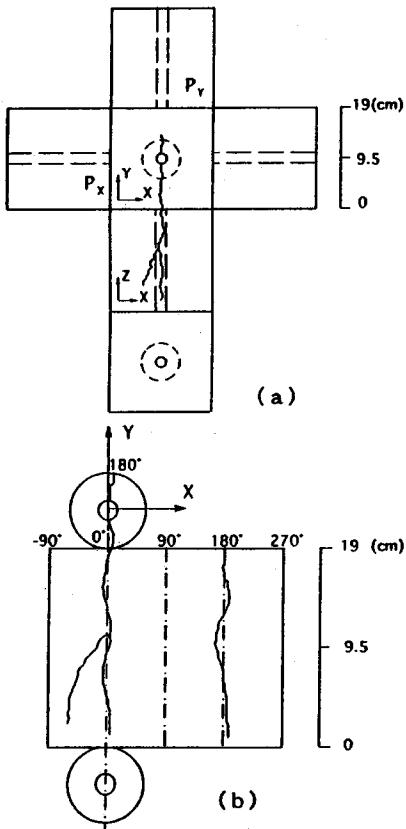


図-7 水圧破碎で発生した可視亀裂のスケッチの展開  
図 (a) 供試体表面での観察結果 (b) オーバー・コアリングしたコアの表面での観察結果

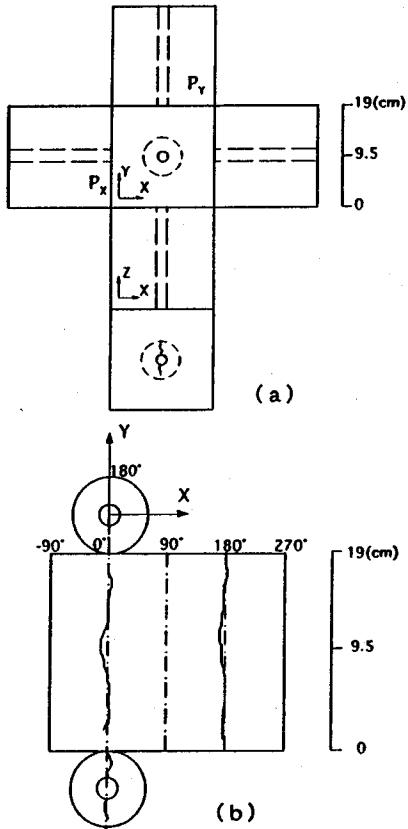


図-9 ウレタン・スリープを用いた破碎で発生した可視亀裂  
のスケッチの展開図 (a) 供試体表面での観察結果  
(b) オーバー・コアリングしたコア表面での観察結果

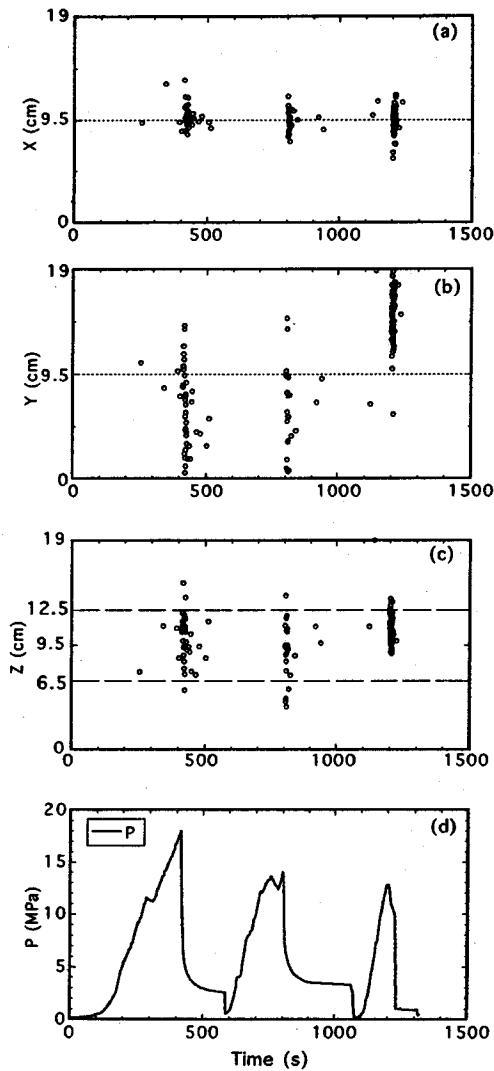


図-10 水圧破碎で発生した AE 震源の時空間分布  
図 (a) AE 震源の X 方向への移動 (b) Y 方向への移動 (c) Z 方向への移動 (d) 圧力一時間曲線

いるといえる。

### (3) AE 震源の時空間分布

AE の震源は加圧時間の経過とともに移動していく。このため、横軸に時間をとり、縦軸に例えば図-6 や図-8 に示した XYZ の各軸をとり、AE の発生位置をプロットすれば、AE の震源が時間とともにどのように移動していくかがより明瞭になる。この図を AE の時空間分布図とよぶことにする。水圧破碎の場合の AE 震源の時空間分布図を図-10 に示す。なお、図-10 の下に(d)図として、図-5 に示した圧

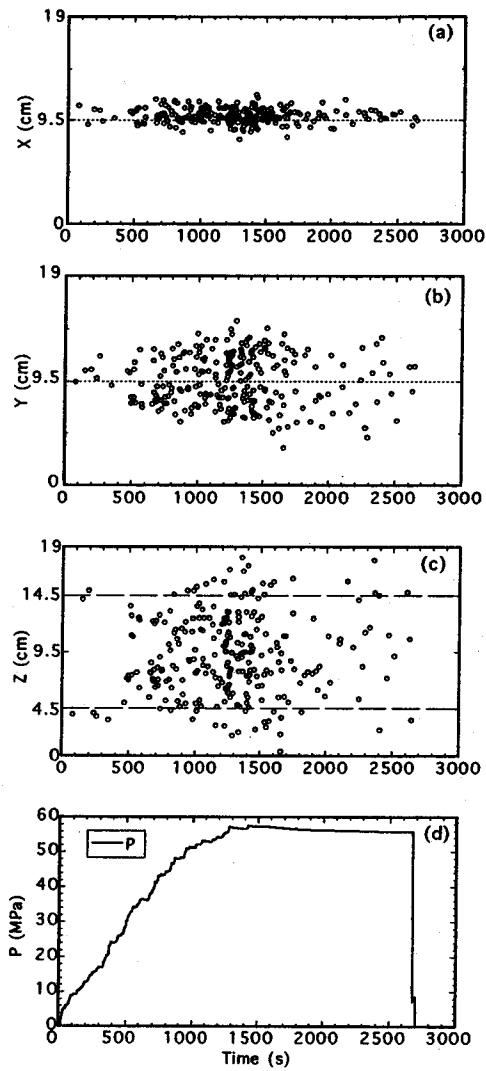


図-11 ウレタン・スリーブを用いた破碎で発生した AE 震源の時空間分布図 (a) AE 震源の X 方向への移動 (b) Y 方向への移動 (c) Z 方向への移動 (d) 圧力一時間曲線

力一時間曲線を比較のため再度示した。さて、図-10(a)は、横軸に時間をとり、縦軸に図-6 に分布を示した震源の X 座標をとってプロットしたものであり、震源の X 方向への経時的な移動を示している。図-10(b)(c)は同様に縦軸に Y 座標、Z 座標をとったものである。図-10(a)(b)の点線は破碎孔の中心座標  $X=9.5\text{cm}$ ,  $Y=9.5\text{cm}$  それぞれ示す。図-10(c)の破線は、加圧区間の両端  $Z=6.5\text{cm}$  と  $Z=12.5\text{cm}$  の位置を示す。まず、これらの図で特徴的なことは AE の発生が経時に 3 つの時期に集中している点である。これらの AE の集中的な発生は図-5(a)に示

した圧力-時間曲線の3回の急激な圧力低下に対応している。AE震源のX方向の経時変化をみると、3回の圧力低下時、すなわち破碎時にいずれも破碎孔を中心とした狭い範囲で発生し、震源の顕著な移動は見られないことがわかる。Y方向の場合には、1回目、2回目の破碎時にはAE震源はY軸の“-”方向に進展、拡大するのに対して、第3回の破碎時には逆にY軸の“+”方向に進展、拡大する傾向がはっきりとみられる。Z方向に関しては、3回の破碎時にいずれもほぼ $6.5\text{cm} < Z < 12.5\text{cm}$ の加圧区間の範囲内でAEが発生していることがわかる。

ウレタン・スリープによる破碎の場合のAE震源の時空間分布図を図-11に示す。この横軸の時間の目盛は図-10のそれの2倍となっている。図-10と比較して特徴的なことは、AEの発生が経時的にある時期に集中せず分布していることである。多くのAEの発生がみられる600s～1400sは圧力約35MPaから約57.5MPaで加圧を中止するまでの時期に対応する。図-11(a)でX方向の経時変化をみると、AE震源は全時間を通じてややXの+方向に偏りをみせながら、破碎孔の中心から供試体全長の約1/12に相当する±1.6cm以内の範囲で発生していることがわかる。これに対して、Y方向の経時変化をみると、AE震源は破碎孔を中心に供試体全長の1/4に相当する±4.8cmをやや越える範囲に分布していることがわかる。これは、X方向の分布範囲の3倍に相当し、最大加圧方向であるY方向に亀裂が進展していることを示している。Z方向については、供試体の全長にわたって、震源が分布していることがわかる。

以上のように、震源の時空間分布図でみると水圧破碎では、圧力の急激な低下すなわち供試体の破碎時にAEが極めて短時間に集中的に発生するのに対して、ウレタン・スリープによる破碎では、このような集中ではなく、経時的に分布する点に特徴があるといえる。これは水圧破碎においては破碎流体が亀裂の先端に侵入してさらに亀裂を押し広げて急速に進展させるのに対し、ウレタン・スリープを用いた破碎ではこのような破碎機構が作用しないためと思われる。また、水圧破碎では1回目、2回目の破碎時に、Yの“-”方向にAEの震源分布がみられ、3回目の破碎時には逆にYの“+”方向に分布がみられる。このようなAE震源分布の経時的な逆転傾向は、花崗岩での水圧破碎に常にみられる普遍的な現象とはいえないかもしれない。しかし、花崗岩は、一般に長石、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。このような花崗岩で水圧破碎を行えば、破碎流体の浸入経路が加圧サイク

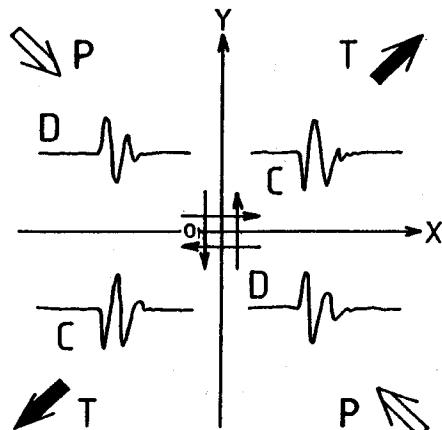


図-12 せん断破壊によるP波初動の分布パターン

ル毎に微妙に変化することは十分に考えられ、またいったん異なる経路に破碎流体が浸入すれば破碎流体が亀裂の先端を押し広げてその方向に亀裂をさらに進展させるため、亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向があるといえる。したがって、このようなAE震源分布の経時的な逆転傾向も、ウレタン・スリープによる破碎には見られない、破碎流体を用いた水圧破碎の特徴的な現象といえよう。

#### (4) AEのメカニズム解

AEの発生に伴って観測点に伝播していくP波初動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(Dilatational)波、押し(Compressional)波のいずれかの極性を有している。いま図-12のように、最大圧縮主応力がP方向、最小圧縮主応力がT方向から作用し、原点Oで矢印のようなせん断破壊が生じ、これに伴ってAEが発生したとする。この場合、第1および第3象限にある観測点には初動が押し波のP波が、第2および第4象限にある観測点には初動が引き波のP波が伝播てくる。逆に震源を決定したAEイベントに対し、多数の観測点でP波の初動の極性を調べることにより、そのAEを発生させたせん断破壊の方向と作用した主応力の方向を知ることができる。すなわち、引き波と押し波の分布を区切る2つの線(図のX軸とY軸)を節面といい、そのいずれかがせん断破壊面の方向を示す。また、引き波と押し波の分布の中心方向がそのせん断破壊を生じさせた最大および最小圧縮主応力の方向であり、それぞれP軸およびT軸とよぶ。なお、岩石供試体の破壊実験で共役的なふたつのせん断面が生じる場合を想像すればわかるように、岩石

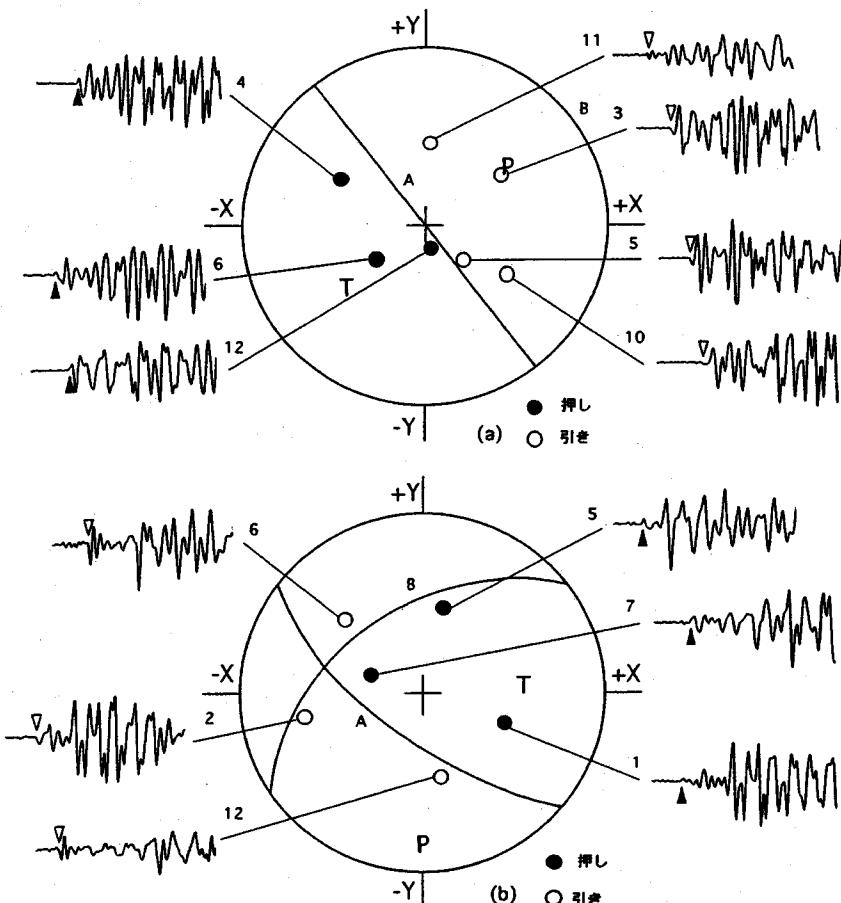


図-13 水圧破碎で発生した AE のメカニズム解 (シュミットネット下半球投影)

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

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

の場合、内部摩擦角  $\theta$  が存在するためにふたつのせん断面は直交せず、 $90^\circ - \theta$  の角度で斜交する。このため、上述のようにして求めた P 軸と T 軸は、最大主応力の作用方向と  $\theta/2$  だけ食い違うことになる<sup>22)</sup>。厳密な意味ではこの違いに注意を払う必要があるが、本論文の以下で述べるような大雑把な傾向の議論では、とくに大きな問題はないものと考える。

引張破壊や爆発的な震源の場合には、すべての観測点で押し波が観測される。一方、図-12のように押し引きが交互に表れる分布を4象限型の分布とよび、このような押し引き分布を示す AE は、一応せん断破壊に伴って生じたものとみなすことができる。しかし、図-12のような4象限型の分布を示す AE でも、厳密には引張破壊成分をかなりの割合で含んでいる複合破壊の場合がある<sup>23)-25)</sup>。したがって、

このような AE に対して得られた節面や P 軸、T 軸の方向が、現実に観察された破壊面の方向や、供試体の載荷状態と矛盾する場合には、せん断破壊ではないと考えるのが妥当である。

図-12には簡単のため2次元の概念図を示したが、震源から各観測点への射出角と方位角を計算し、震源を中心とする球面上での初動の押し引き分布を考え、これをステレオネット上で整理することによって、同様の解析を3次元的に行うことができる<sup>26)</sup>。またこのようして得られた3次元的な解を AE のメカニズム解とよぶ。

上述の解析手法からわかるように、メカニズム解を得るためにには、多数のセンサーで明瞭な P 波初動をとらえる必要がある。しかし、本実験では、初動の押し引きの極性を明瞭に読み取れる AE データは

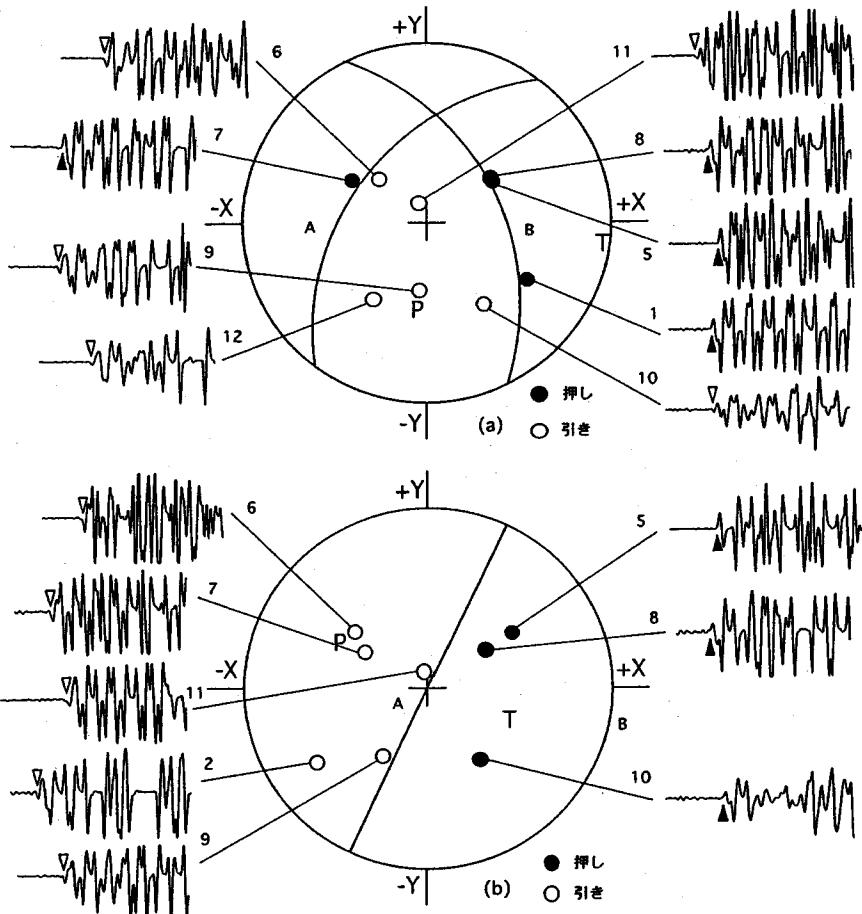


図-14 ウレタン・スリーブを用いた破碎で発生したAEのメカニズム解(シュミットネット下半球投影)

(a) No.1震源 (発生時間 890.37s, 震源座標 X=9.75, Y=12.22, Z=11.68 cm)

(b) No.2震源 (発生時間 1480.03s, 震源座標 X=9.53, Y=12.23, Z=14.39 cm)

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10個程度であった。図-13(a)(b)に、水圧破碎の場合に得られた2つのAEイベントのメカニズム解を示す。これらは、図-5(a)の棒グラフ上に示したように、1回目と3回目の圧力低下に伴って発生したAEイベントである。●印は押し波の観測点、○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）であることを示す。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当てて波形を収録し、センサーの極性を確認した。す

なわち、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。例えば、図-13(a)を見ると、センサーNo.10とNo.11の観測波形はやや初動が不明瞭であるが、他は容易に押し引きの区別がつくことがわかる。

図-13(a)(b)を見ると、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4象限型の分布を示すことが分かる。●（押し波）と○（引き波）の分布を区切る図上の2本の曲線（図-13(a)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、これが3次元的な節面である。図-13(a)(b)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、選択の余地は少ない。一方、選んだ節面が供試体の載荷状態や実際の破壊面の方向と矛盾する場合には、すでに述べたように、初動の押し引きが4象限型の分布をしていても、せん断型の破壊とはいえない。そこでここでは、選択可能な節面の組合せのうちから、供試体の載荷状態や実際の破壊面の方向と最も矛盾が少ないとと思われる節面の組を選び、選択した節面の組が本当に実験条件と矛盾しないかどうか、いいかえれば、確かにせん断型の破壊といえるどうかを検討することにした。さてそれぞれの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<sup>26)</sup>。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。また、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震源を中心とする球面上の●印と○印の分布の中心に求まり、P軸及びT軸とよばれる。これらの方針を図中にP、Tの文字の位置で示した。

さて、図-13(a)に示した水圧破碎の場合のNo.1イベントのメカニズム解では、節面は+Y方向から-X方向に38°の角をなす鉛直面Aと水平面B(XY面)の2つである。(+Z方向を鉛直上向とする)。巨視的な亀裂がY方向の鉛直面に沿って進展していることから、せん断面は水平面Bではなく、Y方向に近い鉛直面Aであろうと推測される。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。したがって、単純に考えればP軸はY方向、T軸はZ方向と予想される。しかし、水圧による加圧はZ方向に長い破碎孔の円筒面になされ、巨視的な亀裂がY方向の鉛直面に沿って進展しているから、T軸はX方向である方がむしろ合理的である。水圧破碎の亀裂は、個々の微小亀裂が集積、連結して巨視的亀裂を形成すると考えられる。上述のP軸、T軸の方向の議論は巨視的亀裂に対するものであるから、個々の微小亀裂に対応するAEイベントのP軸、T軸はこれからややずれるのが一般的と思われる。このように考えると、図-13(a)のP軸、T軸の方向は概ね妥当と思われる。

次に、図-13(b)のメカニズム解を見ると、2つの節面A、BのうちAの方がBに比べて走向がY軸に近く、傾斜も鉛直に近い。したがって、A面をせん断面と考えるほうが自然である。P軸、T軸の方向はいずれも水平に近く、それぞれY軸、X軸の方向に近い。これらのことから、このAEイベントのメカニズム解は巨視的な亀裂の生成メカニズムと調和

的である。

このように、図-13の2つのメカニズム解は、初動の押し引きが4象限型の分布をし、しかも供試体の載荷状態や実際の破壊面の方向と矛盾しない。したがって、これらのAEはせん断破壊によって発生したと考えられる。

ウレタン・スリーブを用いた破碎の際に得られたAEのメカニズム解の例を図-14(a)(b)に示す。これらの発生時刻は図-5(b)の棒グラフ上に示した。図-14(a)(b)を見ると、水圧破碎の図-13(a)(b)の場合と同様、P波初動の方向が押し波と引き波が交互に表われる4象限型の分布を示すことがわかる。

図-14(a)をみると、2つの節面はいずれも巨視的亀裂の方向であるY軸方向の鉛直面に近く、いずれの節面をせん断面と考えても巨視的亀裂の方向と調和的である。供試体の載荷状態は水圧破碎の場合と同じであり、このメカニズム解のP軸、T軸の方向は供試体の載荷状態と調和的である。

図-14(b)のメカニズム解では、節面は+Y方向から+X方向に24°の角をなす鉛直面Aと水平面Bの2つである。巨視的な亀裂の方向と比較して、せん断面はY軸方向に近い鉛直面Aと推測される。P軸、T軸の方向は供試体の載荷状態とややずれているが、巨視的亀裂を構成するひとつの微小破壊と考えれば、十分ありうる破壊メカニズムと思われる。

このように、図-14の2つのメカニズム解も、初動の押し引きが4象限型の分布をし、しかも供試体の載荷状態や実際の破壊面の方向と矛盾しない。したがって、これらのAEもせん断破壊によって発生したと考えられる。

以上述べたように、水圧破碎とウレタン・スリーブを用いた破碎のAEのP波初動メカニズム解は、いずれもせん断破壊によって発生したと考えられた。ここでは水圧破碎のAEを2例、ウレタン・スリーブを用いた破碎のAEを2例示したが、これ以外に各破碎方式ごとにそれぞれ5個程度のAEのメカニズム解を検討した。5個程度に限定したのは、これ以外のAEについては十分な数のセンサーでP波初動の押し引きが読み取れず、メカニズム解を得ることができなかつたからである。メカニズム解を検討したAEについては、ここに例示したAEと同様な傾向が得られた。したがって、初動が多数のセンサーで明瞭に読み取れる規模の大きなAEのメカニズム解からみるかぎり、水圧破碎とウレタン・スリーブを用いた破碎に大きな相違はなく、いずれもせん断型の破壊を示す点に特徴が見られると言える。

このように、破壊メカニズムとしてはいずれの場合もせん断破壊が卓越し差異はないが、すでに述べ

たように、水圧破碎の場合、ウレタン・スリーブによる破碎に比べて、亀裂の進展速度が大きく、また亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向が明らかであった。このことは、巨視的な亀裂の進展機構は破碎流体の存在の有無によって異なるが、個々の微小亀裂の発生機構はともにせん断型で同一であることを意味しているように思われる。しかし、この種の破壊機構は、破碎流体の性質によっても異なると思われる。すでに、破碎流体に水と油を用いた実験を行い、現在その結果を比較検討しており、これらの点について、今後さらに研究を進めて行きたいと考えている。

#### 4. まとめ

水圧破碎における破碎流体の存在が岩盤の破碎メカニズムにどのような影響を与えるかを検討するため、破碎流体を用いない破碎試験として、ウレタンを介して破碎孔の孔壁に圧力を作用させる試験を行い、これを通常の水圧破碎の場合と比較した。供試体には1辺19cmの立方体の花崗岩を用い、側圧を加えた2軸応力状態で供試体を破碎した。その際に、供試体の上下面にAEセンサーを設置し破碎に伴うAEを測定した。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 圧力-時間曲線を比較すると、水圧破碎実験では急激で大きな圧力低下が生じるのに対し、ウレタン・スリーブを用いた破碎では、このような圧力低下が生じていない点に特徴が見られる。水圧破碎実験で見られる大きな圧力低下は、亀裂の発生にともない水が亀裂内に浸入するためである。この場合には亀裂の先端にまで水圧が作用するため、亀裂は急速に進展する。これに対し、ウレタン・スリーブを介した載荷では、供試体に亀裂が発生してもウレタン・パッカー内部の流体はその内部にとどまり、亀裂に浸入しない。このため、圧力低下は急激生じず、亀裂の進展もゆっくりとした逐次的破壊になると思われる。

(2) AE発生頻度の時間的な分布を比較すると、水圧破碎の場合には破碎圧の発生に伴い、AEが瞬間に集中的に発生するのに対し、ウレタン・スリーブを用いた破碎の場合には、AEは全時間にわたってほぼ均等に発生する傾向が見られた。このことは、上述の亀裂発生形態の違い、すなわち、水の場合には亀裂に水が浸入して短時間に急激に亀裂が進展するのに対し、ウレタン・スリーブの場合には破碎孔周辺で徐々に逐次的に亀裂が進展するという違いを反映しているといえる。

(3) AEの震源決定の結果より、水圧破碎とウレタン・スリーブを用いた破碎のいずれの場合にも、発生した亀裂は破碎孔を中心として加圧区間から最大加圧方向に平面的に成長したことがわかった。水圧破碎の場合には、亀裂が供試体の両端面にまで到達したのに対し、ウレタン・スリーブを用いた破碎では、亀裂は端面まで進展せず破碎孔の周辺にとどまった。また、AEの震源決定の結果は、目視による亀裂の観察結果と概ねよい一致を示した。

(4) 震源の時空間分布でみると、水圧破碎では、圧力の低下すなわち供試体の破碎時にAEが極めて短時間に集中的に発生するのに対し、ウレタン・スリーブによる破碎では、このような集中ではなく、経時的に分布する点に特徴があるといえる。このような相違は、水圧破碎においては破碎流体が亀裂の先端に侵入してさらに亀裂を押し広げて急速に進展させるのに対し、ウレタン・スリーブを用いた破碎ではこのような破碎機構が作用しないためと思われる。

(5) 水圧破碎では1回目、2回目の破碎時に、Yの“-”方向にAEの震源分布がみられ、3回目の破碎時には逆にYの“+”方向に分布がみられた。供試体に用いた花崗岩の内部には多数の微細な割れ目が存在する。このような供試体で水圧破碎を行えば、破碎流体の浸入経路が加圧サイクル毎に微妙に変化することは十分に考えられ、またいったん異なる経路に破碎流体が浸入すれば破碎流体が亀裂の先端を押し広げてその方向に亀裂をさらに進展させるため、亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向があるといえる。したがって、このようなAE震源分布の経時的な逆転傾向も、ウレタン・スリーブによる破碎には見られない、破碎流体を用いた水圧破碎の特徴的な現象といえよう。

(6) AEのメカニズム解を見ると、水圧破碎とウレタン・スリーブを用いた破碎のいずれの場合も、P波初動に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った。このように、AEのメカニズム解からみるかぎり、水圧破碎の場合もウレタン・スリーブを用いた場合も、個々の微小破壊のメカニズムには大きな違いはなく、いずれの場合もせん断型の破壊を生じているといえる。

(7) このように、破壊メカニズムとしてはいずれの場合もせん断破壊が卓越し差異はないが、水圧破碎の場合、ウレタン・スリーブによる破碎に比べて、亀裂の進展速度が大きく、また亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向が明らかである。このことは、巨視的な亀裂の進展機構は破碎流体の存在の有無によって異なるが、個々の微小亀裂の発生機構はともにせん断型で同一であることを意味しているように

思われる。しかし、この種の破壊機構は、破碎流体の性質によっても異なると思われる。すでに、破碎流体に水と油を用いた実験を行い、現在その結果を比較検討しており、これらの点について、今後さらに研究を進めて行きたいと考えている。

**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終始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) 国立天文台編、理科年表(1995年度版)、pp. 641-658、丸善、1994。
- 2) 電気事業連合会広報部への問い合わせ結果による。
- 3) Smith, M. C., Nunz, G and Ponder, G. M.: Hot dry rock geothermal energy development program (Annual Report Fiscal Year 1982), *LANL Report, LA-9780-HDR*, 1983.
- 4) 海江田秀志、掘義直：高温岩体発電の実用化に向けて、OHM、1994年7月号、pp.48-54、1994。
- 5) Hubber, M. K. and Willis, D. G.: Mechanics of hydraulic fracturing, *Petroleum Transactions American Society of Mining Engineers*, vol.210, pp.153-168, 1957.
- 6) Haimson, B. C.: The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.167-178, 1978.
- 7) 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.
- 8) 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, The Japanese Society of NDI*, 1986.
- 9) 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. ロスマラモスの大規模水圧破碎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.
- 10) 佐々木俊二, 石田毅, 金川忠: 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発——水圧破碎で発生する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.
- 11) Talebi, S. and Cornet, F. H.: Analysis of the microseismicity induced by a fluid injection in a granitic rock mass, *Geophys. Res. Lett.*, 14, pp.227-230, 1987.
- 12) Lockner, D. and Byerlee, J. D.: Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress, *J. Geophys. Res.*, Vol.82, pp.2018-2026, 1977.
- 13) Majer, E. L. and Doe, T. W.: Studying hydrofractures by high frequency seismic monitoring, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.23, pp.185-199, 1986.
- 14) 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碎評価技術の開発——AEから推定される水圧破碎の破壊メカニズム——、電力中央研究所報告・研究報告、No.U88034, 1988.
- 15) 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碎評価技術の開発——水圧破碎に伴うAEと破壊メカニズムに及ぼす岩石の粒径と破碎流体の粘性効果——、電力中央研究所報告、研究報告、No.U91008, 1991.
- 16) 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。
- 17) Bredehoeft, J. D., Wolff, R. G., Keys W. S. and Shuter, E.: Hydraulic fracturing to determine the regional *in situ* stress field, Piceance Basin, Colorado., *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, pp.250-258, 1976.
- 18) 佐久間彰三:孔内載荷による地山応力測定法の開発に関する研究、京都大学工学部学位請求論文、pp.78-79、1991。
- 19) Rothman, R. L., Greenfield, R. J. and Hardy, Jr. H. R.: Errors in hypocenter location due to velocity anisotropy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.64, No.6, pp.1993-1996, 1974.
- 20) 佐藤嘉見、勝山邦久: 縦波伝播速度の異方性がある場合のAE震源の数値解析法、探鉱と保安、vol. 31, No.6, pp. 291-298, 1985.
- 21) 石田毅、北野晃一、木下直人、若林成樹: AE測定による原位置花崗岩加熱時挙動の観測、土木学会論文集、第424号/III-14, pp.187-195, 1990.
- 22) Yamakawa, N.: Stress fields in focal regions,

- Journal of Physics of the Earth*, Vol.19, No.4,  
pp.347-355, 1971.
- 23) Gibowicz, S. J.: The mechanism of seismic events induced by mining, *Proceedings of the Second International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis*, pp.3-27, 1988.
- 24) Ohtsu, M., Shigeishi, M. and Iwase, H.: AE observation in the pull-out process of shallow hook anchors, *Proc. of JSCE*, No.408/V-11, pp.177-186,
- 1989.
- 25) Ohtsu, M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: Application to in situ hydrofracturing test, *J. Geophys. Res.*, Vol.96, No.B4, pp.6211-6221, 1991.
- 26) 笠原慶一: 地震の力学, 鹿島出版会, pp.28-45, 1983.

(1995.10.2 受付)

## EFFECT OF INJECTED WATER ON HYDRAULIC FRACTURING DEDUCED FROM ACOUSTIC EMISSION MONITORING

Qu CHEN, Tsuyoshi ISHIDA and Yoshiaki MIZUTA

Hydraulic fracturing experiments were conducted by employing usual water injection and an urethane sleeve pressurized on a borehole. The results of experiments were compared in order to investigate effects of injected water. Fault-plane solutions of recorded AE(acoustic emission) elucidated that shear type microcracks are dominant in the both cases. However, while quick and large pressure drops with bursts of AE were observed by water injection, the pressure increased and decreased gradually with an almost constant rate of AE occurrence by pressurizing through the sleeve. This indicates that cracks extend longer and more rapidly by water injection than the case by pressurizing through the sleeve. In usual hydraulic fracturing, thus, injected water play a role to fracture and extend the crack tips. This effect obviously characterizes the mechanism of usual hydraulic fracturing.