



AE と X 線 CT を用いた間隙水圧上昇による Berea 砂岩の破壊の観測 *

石 田 毅¹ 深 堀 大 介² 石 田 基³ 佐 藤 亮 介⁴
村 田 澄 彦⁵ 小 野 塚 重 信⁶ 大 瀬 戸 一 仁⁷ 山 本 晃 司⁸

AE Monitoring and X-ray CT Observation for Failure of Berea Sandstone with Pore Pressure Increase

by Tsuyoshi ISHIDA^a, Daisuke FUKAHORI^b, Motoi ISHIDA^c, Ryosuke SATO^c,
Sumihiko MURATA^d, Shigenobu ONOZUKA^e, Kazuhito OSETO^e and Koji YAMAMOTO^e

- a. Professor, Kyoto University, Kyoto, 615-8540, JAPAN
(Corresponding author E-mail: t.ishida@ky7.ecs.kyoto-u.ac.jp / FAX:075-383-3213)
- b. Assistant Professor, Kyoto University
- c. Postgraduate student of Kyoto University
- d. Associate Professor, Kyoto University
- e. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

AE (acoustic emission) events have been monitored with water injection in enhanced oil recovery and in a fractured reservoir of oil and gas fields to detect reservoir behavior with pore pressure increase. Since the AE events are induced by various causes, it is important how to obtain useful information from the monitored AE events. Thus, in this research, we monitored AE events in a tri-axial experiment of Berea sandstone under control of pore pressure, to simulate AE monitoring in oil and gas fields.

The results have demonstrated the followings.

- (1) The failure that is induced by pore pressure increase and accompanies the AE events could be explained and predicted by Mohr-Coulomb's failure criterion and Terzaghi's effective stress theory.
- (2) Places where failures are induced could be clarified by source location of the monitored AE events.
- (3) Fault plane solutions of the AE events are consistent with the directions of the induced macroscopic fracture plane and the stress condition applied in the experiment.

It could be concluded that AE is useful to monitor reservoir behavior with pore pressure increase, although further investigations from various aspects are needed.

KEY WORDS: Acoustic Emission, X-ray CT, Pore Pressure, Tri-Axial Test, Sandstone, Rock Mechanics

1. 結 言

石油や天然ガスあるいは oil sand の生産に関連して、極微小な地震、すなわち AE (Acoustic Emission) の観測が試みられる事例が増えてきている。石油の生産では、自墳により回収される油の量は埋蔵量の 20% 程度であり、さらに 10 ~ 30% は水や天然ガス、二酸化炭素ガスなどの流体を地下に圧入する増進回収法 (EOR : Enhanced Oil Recovery) により回収されるが、残りは放棄されて

いる。増進回収に伴う AE 観測は、北海油田の Ekofisk や Valhall、米国 Kentucky 州 Clinton 郡の油田での試みが報告されている¹⁾。増進回収に伴う AE の発生は、流体の圧入による間隙流体圧の増大、あるいは石油や天然ガスの生産による間隙流体圧の低下により発生すると思われるが、その発生メカニズムは必ずしも十分には明らかではない。一方、従来型の典型的な石油・天然ガス田と異なり、岩盤内の亀裂に石油・天然ガスをはい胎している Fractured Reservoir に水を圧入した際に AE を観測し、その結果から石油や天然ガスをはい胎している亀裂の位置を検出することも試みられている。このような Fractured Reservoir における観測は、例えば北海道の勇払で行われているが²⁾、間隙流体圧の上昇に伴い地質構造に依存して AE が発生することに基づく観測といえる。一方、oil sand からの原油回収では、地下に高温の蒸気を圧入し、砂に固着した Bitumen を温めて流動性を高め回収する方法がとられるが、oil sand 層から蒸気が漏洩するのを防止するための監視法として、AE の観測が試みられている³⁾。これらはいずれも、地下の間隙流体圧の変化に伴う AE の発生であるが、このような現象を室内実験で再現して検討した例はあまりみられない。

*2009 年 7 月 21 日受付 2009 年 12 月 3 日受理

1. 普通会員 工博 京都大学大学院 教授 工学研究科社会基盤工学専攻

2. 普通会員 工博 京都大学大学院 助教 工学研究科社会基盤工学専攻

3. 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 修士課程

(現在 NEC エレクトロニクス (株))

4. 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学 専攻修士課程

5. 普通会員 工博 京都大学大学院 准教授 工学研究科社会基盤工学専攻

6. (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 技術センター

7. (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 技術センター (現在 三井物産 (株))

8. 工博 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 技術センター

[著者連絡先] FAX: 075-383-3213 (京都大・石田)

E-mail: t.ishida@ky7.ecs.kyoto-u.ac.jp

キーワード: AE, X 線 CT, 間隙水圧, 3 軸試験, 砂岩, 岩盤力学

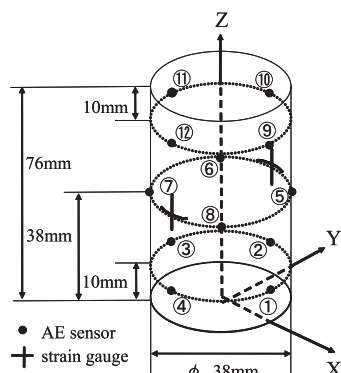


Fig.1 Specimen and positions of AE sensors and strain gauges.

そこで本研究では、このような現象を再現する最も基礎的な試験として、3 軸応力下の均質な Berea 砂岩供試体に間隙水圧を加圧して破壊し、AE を測定する実験を行った。また破壊した供試体を X 線 CT で観察し、造成された破壊面と AE の発生メカニズムを比較検討した。

なお本研究において、応力とひずみは圧縮を正とする。また石油工学の分野では、質量は pound (lb)、長さは inch (in) または feet (ft)、圧力は pound per square inch (psi) が用いられるため、これらの値を併記した。参考までに 1 (lb) = 0.4536 (kg)、1 (in) = 2.540 (cm)、1 (ft) = 30.48 (cm)、また重力加速度を 0.9807 (m/s²) と仮定すると、1 (psi) = 6.895 (kPa) である。

2. 実験方法

2・1 供試体と載荷方法

実験に用いた供試体は直径 38mm、長さ 76mm の円柱形の室内乾燥させた Berea 砂岩である。Fig. 1 に示すように、AE 測定のため共振周波数 300kHz の直径 5mm、厚さ 6.7mm の PZT 型圧電素子を、供試体中央と上下端面からそれぞれ 10mm の 3 断面に 4 個ずつ合計 12 個貼り付けた。またひずみ測定のためゲージ長 5mm のクロスゲージ 2 枚を供試体中央の正対する位置に貼り付けた。供試体の 3 方向の P 波速度を測定したところ、 $V_x=2.46$ 、 $V_y=2.48$ 、 $V_z=2.46$ km/s であり、供試体はほぼ均質等方であった。また、供試体に用いる Berea 砂岩に対し事前に透水試験を行ったところ 92.1 ミリダルシー (92.1×10^{-15} m²) と透水性が大きく、間隙水圧を加えると供試体全体が数秒で飽和状態となることを確認している。

3 軸試験機の概要を Fig. 2 に示した。供試体をエンド・キャップ (ペDESTAL) とともにシリコンゴムで被覆して 3 軸圧力セル内に設置した。バルブ①を閉じた状態で、まずバルブ②、③、④、⑤を開けてエアークンプレッサーを作動させ、圧縮空気でタンクの油を 3 軸セル内に注入し充填した。バルブ⑤から油があふれ出し 3 軸セル内の空気が完全に押し出されたことを確認した後、バルブ②、③、④、⑤を閉め、バルブ⑥を開けて、プースターによって加圧された油で拘束圧を供試体に載荷した。軸圧は、アクチュエーターによりピストンで供試体に載荷した。軸圧はロードセル A で、拘束圧はバルブ⑥の供試体側の圧力変換器 B で測定した。間隙水は、バルブ⑦を開けてプースターポンプで供試体の下部から供給し、プースターポンプからの供給圧を圧力変換器 C で、供試体の下側の流入圧を圧力変換器 D で、供試体の上側の排水圧を圧力変換器 E で測定した。

2・2 載荷圧の設定と対象とする貯留層の地圧状態

3 軸試験の拘束圧、軸圧、間隙水圧は、生産に伴う微小地震観

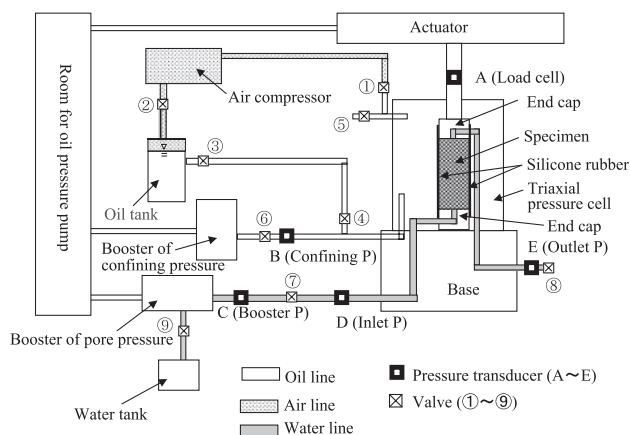


Fig.2 Diagram of loading system for the triaxial compression test.

測の可能性を検討している中東地域の実油田の地圧状態と間隙流体圧を参考とした。この油田で生産の対象としている貯留層は、水深数 m の海底下約 2300m (7500ft) に位置し、岩石の密度約 2.24g/cm³ から推定される岩盤の自重に基づく鉛直地圧は 51.6MPa (7500psi) である。水平方向の最小地圧は、地表部の孔口で測定した水圧破砕の Shut-In pressure 12.4MPa (1800psi) に破砕深度の管内の泥水柱圧 23.8MPa (3450 psi) を加えた 36.2MPa (5250psi) であり、水平最大地圧は同じく水圧破砕データから 56.9MPa (8250psi) と推定される。従って、現地では鉛直地圧が中間主応力となり、水平最小地圧が最小主応力、水平最大地圧が最大主応力となる。この地圧状態は、現地で横ずれ断層に伴う微小地震が多発することと調和的である⁴⁾。なお、現地の貯留層に関して推定される岩盤の破壊規準をこの地圧状態と比較すると、破壊限接近度 r/R (R : モールの応力円の中心と破壊規準線までの距離、 r : モールの応力円の半径) は約 0.8 となる。貯留層圧 (地層圧) と呼ばれる原油を含む流体が油層から湧出する圧力は、23.8MPa (3450psi) であり、これが原油生産前の貯留層の間隙流体圧である⁵⁾。一般に貯留層圧は原油の生産に伴い 1 ~ 3MPa (200 ~ 500psi) 程度低下し、その後水を圧入する増進回収法 (水攻法) により上昇するが、その上昇幅はせいぜい 7MPa (1000psi) 程度と推測される。

この油田の貯留層は炭酸塩岩からなるが⁶⁾、この炭酸塩岩は地下深部からコアとして採取するしか採取方法がないため実験に使用できる量が少なく、また岩質が不均質で再現性のある実験が難しい。そこで、比較的入手が容易で堆積岩の標準的な試料として用いられることが多い均質な Berea 砂岩を供試体に用いることとした。試験に用いた Berea 砂岩は、現地の炭酸塩岩より強度が大きいので、現地の貯留層の地圧をそのまま供試体に載荷して間隙水圧を上昇させても、破壊が生じないのは明らかである。そこで、実験の拘束圧 σ_3 には現地の最小主応力に等しい 36.20MPa を載荷することにし、軸圧 σ_1 については、実験に用いる Berea 砂岩に対して予備試験を行って破壊規準を求め、現地の貯留層の破壊限接近度が約 0.8 であることを考慮して上記の拘束圧で破壊限接近度がこれより少し大きい 0.85 となる 116.9MPa まで上昇させて保持することにした。一方、間隙水圧 P については、現地の貯留層圧 23.8MPa をこの試験の初期間隙水圧 P_0 とした。

2・3 AE の測定方法と X 線 CT による供試体の観察方法

AE センサーは Fig. 1 にすでに示したように、供試体表面に 12 個接着した。これらのセンサーで受振した AE 信号を、各チャンネルともプリアンプで 40dB、メインアンプで 30dB、合計 70dB

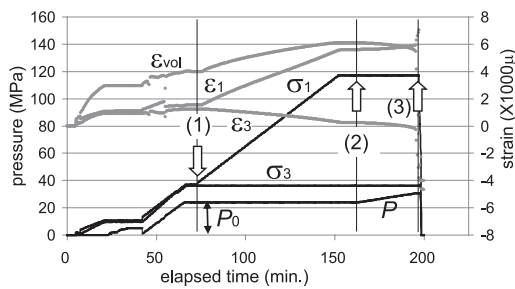


Fig.3 Stresses and strains along the elapsed time.

増幅した。AE 波形の収録にはすでに報告した静的破砕剤の実験⁷⁾に使用したのと同じ装置 (岩通 01 型 AE データ集録解析装置, 特注品) を用いた。この装置は, 最小サンプリング時間 50ns, 分解能 8bit, 記録長 2048byte の A/D 変換器を 12ch 搭載し, イベント間の最小不感時間 (dead time) の長さを 128byte に設定して, 最大 16384 個の AE の波形を連続的に収録できる。この装置でサンプリング時間を最小の 50ns に設定した場合, 102.4μs の継続時間を有する各 AE 波形を, 6.4μs の不感時間で 1.78s 間連続的に測定できることになる。波形データ量は, 2048byte × 12ch × 16384 個 = 393MB となり大きい, 測定中はこれを DRAM (Dynamic Random Access Memory) に保存し, 測定終了後, 圧力などのデータとともに 650MB の PD (Phase Change Rewriteable Disk) に転送して収録する⁸⁾。今回の測定ではサンプリングタイムを 0.1μs に, またセンサーのリングング (受振した AE 信号が減衰せず次の AE 信号を受振しても波動が重畳して初動が読み取れない状態) によるミストリガーを防ぐため, 不感時間を AE の測定データ長 204.8μs の約 6.4 倍の 1.32ms に設定した。このため, 1 秒間に約 650 個の AE イベントを 25s 間連続的に観測することが可能であり, 今回の実験で供試体に生じる亀裂の進展を十分観測できる。

また, 震源決定できる良質な AE 波形を選択的に収録できるように, 3 次元的に供試体のほぼ対角線の位置にある少なくとも 1 組のセンサーで受振した AE 波形を取り込む AE 波形収録のための論理を設定した。具体的には, AE センサー番号が 1 と 11, 4 と 10, 3 と 9 の 3 組のうち, いずれか 1 組の 2 つのセンサーでしきい値以上の電圧の信号を同時に受振した時にだけ, A/D 変換機にトリガーをかける論理を設定した。なお, プレトリガーは測定データ長の 1/2 の 102.4μs に設定した。

一方実験後に, 供試体の破壊状態を把握するため, 医療用 X 線 CT スキャナー (TOSHIBA Aquilion16) を用いて供試体の X 線 CT 撮影を行った。X 線 CT による観察では, AE センサーやひずみゲージなど密度の大きな金属製品は撮影の妨げとなるため削り取る必要があるが, 供試体をシリコンゴムで被覆したまま撮影することができる。このため, 3 軸セルから取り出した供試体は破壊面で分離することなく, ほぼ当初の形状を保持したままに破壊面の形状を 3 次元的に把握し記録することが可能である。

3. 実験結果と考察

軸圧, 拘束圧, 間隙水圧, ひずみの経時変化を Fig. 3 に示す。実験は次の手順で行った。

3・1 軸圧, 拘束圧, 間隙水圧の経時変化

3・1・1 第 1 ステップ まず供試体を三軸セル内に設置して軸方向に軽く载荷した後, 軸方向変位が生じないように軸圧 (σ_1) を制御しながら拘束圧 (σ_3) をまず 9.64MPa まで载荷し, その後設定圧の 36.2 MPa まで上昇させた。この操作により, 载荷

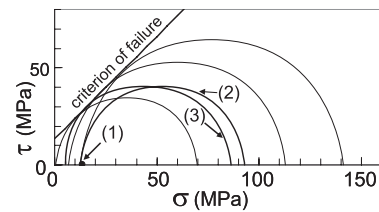


Fig.4 Failure criterion and stress path of the experiment. Mohr's circles when specimens failed at the preliminary triaxial tests are shown with thin lines.

圧はほぼ静水圧状態を維持しながら上昇し, 軸圧は 36.8 MPa まで上昇した。さらにこの間供試体下部から注水を行い, 間隙水圧 (P) を予定した初期間隙水圧 (P_0) である 23.8 MPa まで上昇させた。なお, 供試体はすでに述べたように透水性が高く, 供試体下部から間隙水圧を加えると数秒後には, 供試体上部で測定している間隙水圧が供試体下部の間隙水圧と同じ値になる。(実験開始から Fig. 3 の (1) の状態まで)

3・1・2 第 2 ステップ この状態から軸圧のみを破壊限接近度が 0.85 となる 116.9 MPa まで上昇させてせん断応力を作らせ, 10 分程度保持した。(1) から (2) まで)

3・1・3 第 3 ステップ 間隙水圧だけをさらに上昇させたところ, 7.02 MPa 上昇した 30.8 MPa で供試体は破壊した。(2) から (3) まで)

3・2 ひずみの変化

Fig. 3 にはひずみゲージで測定した軸方向ひずみ (ϵ_1), 横方向ひずみ (ϵ_3) とともに, これらから求めた体積ひずみ ($\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$) を示した。間隙水圧を破壊に向けて上昇させ始めた (2) の直前の 10 分間は, 軸圧, 拘束圧, 間隙水圧を一定に保持しているため, それまで圧縮の増大を示していた体積ひずみもほぼ一定となっている。(2) の状態で, すでに述べたように破壊限接近度は 0.85 となっていたが, 軸圧のみを上昇させると, 圧縮ひずみがさらに増大する可能性のある状態と思われた。しかし軸圧と拘束圧一定のまま, 間隙水圧だけをさらに上昇させると, 軸ひずみは一定もしくはさらに圧縮の増大を示すが横ひずみは減少し, 体積ひずみは上に凸の形状を示し圧縮の増大から減少, すなわち膨張傾向に転じて破壊に至った。

なお経過時間 54.9 分で, 軸方向ひずみ (ϵ_1) に 350μ 程度の不連続な低下がみられ, 同時に横方向ひずみ (ϵ_3) にも 280μ 程度の低下が見られ, これらの値から計算された体積ひずみにも不連続な低下が生じている。30 秒後の 55.4 分の次の測定で, 軸方向ひずみは低下したままであるが, 横方向ひずみは元の値にほぼ復帰している。おそらく, ひずみゲージ添付位置の鉱物粒子の移動などによる不連続な変化と思われるが, これ以降の測定ひずみに異常はみられず, 測定値の信頼性に大きな問題はないと思われる。

3・3 破壊規準と応力経路

Fig. 4 は, 予備実験で求めた破壊規準と今回の実験の応力経路をモール円で示したものである。予備実験では, 実験に用いたのと同じ岩石ブロックから採取した室内乾燥状態の 3 個の供試体に対して, 拘束圧 0.88, 7.11 及び 12.5MPa 一定の排水条件下で三軸载荷を行ったところ, それぞれ軸圧 69.85, 112.9, 141.13MPa で破壊した。図中に細い実線で示した 3 つの円は, この予備試験の破壊時のモール円であり, これらの円を包絡する図中の直線を破壊規準と考え, 粘着力 $c=13.5$ MPa, 内部摩擦角 $\phi=46.5^\circ$ を得た。

次に Fig. 4 の (1), (2), (3) の文字を付した太い実線の 3 つの円は, Fig. 3 の (1), (2), (3) の時点における応力状態を示す。(1) は

Table 1 Data of located AE sources.

ID No.	Elapsed time (min.)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	O-C Max (#1) (μ s)	SD (#2) (μ s)	Number of data
1	194.11	14	-11	54	2.47	1.51	11
2	194.90	-18	-3	21	1.80	1.09	8
3	194.93	-5	18	35	4.54	1.97	11
4	194.94	12	-4	50	0.05	0.03	5
5	194.95	10	10	45	3.69	1.49	12
6	194.95	10	16	48	0.49	0.28	6
7	194.95	5	16	45	0.79	0.53	6

(#1) Maximum absolute value of differences between observed (O) and back-calculated (C) P-wave arrival time.

(#2) Standard deviation of the differences, O-C.

ほぼ静水圧状態であるため直径が小さく点で示しているが、軸圧の上昇によりモール円の直径が大きくなって (2) の状態となり、次いで間隙水圧の上昇に伴って有効応力が減少し、応力円が σ 軸の負方向に平行移動して (3) の状態になり破壊規準にほぼ接したことがわかる。

3・4 AE の震源分布と X 線 CT 画像の比較

AE は破壊 (Fig. 3 に矢印 (3) で示した時刻) 直前の 1 分間だけに集中的に発生したが、各センサーへの P 波初動の到達時間の差から、次の条件をすべて満たして震源の位置を決定できたのは、7 個の AE イベントだけであった、

- ①センサー数 (データ数) は 5 個以上である。
- 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 2μ s 以下である。

なお走時残差とは、波形から読み取った P 波初動到達時刻と、決定された震源座標と発生時刻から逆算された P 波初動到達時刻の差を言う。Table 1 に決定された 7 個の AE 震源の発生時刻、震源座標、走時残差などを示すが、この表で O-C Max は、データ数だけある走時残差のうち絶対値が最大の値を、SD は走時残差の標準偏差を示す。供試体の平均的な P 波伝播速度が 2.47km/s であり、条件③の標準偏差 2μ s の間に伝播する距離は 5mm 程度であるので、誤差は最大でも 5mm 程度と推測される。

一方実験後に、供試体の Z 方向に、撮影幅 0.5mm の X 線 CT 撮影を 0.5mm 間隔で行った。撮影で得られた画像は分解能 0.351mm の 2 次元画像であるが、各断面の 2 次元画像を積み重ねることで 3 次元画像を得ることができる。また、3 次元画像から任意の断面の画像を再構成することができる。供試体中心部の XZ 断面 ($Y=0\text{mm}$) の画像を再構成して震源決定結果と比較した結果を Fig. 5 に示す。図中の番号は発生した時刻の順を示しており、Table 1 の震源番号に対応している。全試験時間約 200 分に対し、No.1 から No.7 までの AE 発生に要した時間はわずか 50.4 秒である。ここに示した CT 画像では密度の小さい部分が黒っぽく見えているが、黒く見える巨視的な亀裂と AE 震源がほぼ一致していることが分かる。

Fig. 5 は 2 次元の比較であり、紙面に直交方向 (Y 方向) で震源位置と亀裂が一致しているかどうかについては確認ができない。そこで、7 個の震源のそれぞれについて震源の Y 座標に最も近い ZX 断面の CT 画像を再構成し、震源位置と 3 次元的な比較を行った。その結果、7 個のうち No.4, No.5, No.6 の 3 個の震源については、3 次元的な震源位置が CT 画像に見られる亀裂のごく近傍にあることがわかった。ZX 断面の CT 画像は Y 方向に 0.351mm 間隔で得られるため、Fig. 6 (a) ~ (c) はこれらの 3 個の震源位置を、その震源の Y 座標に最も近い ZX 断面の CT 画像上にプロットしたものである。Fig. 6 (a) を見ると、震源 No.4 は供試体右上部の巨視的な亀裂のすぐ下に位置することがわかる。Fig. 6 (b) を見ると、震源 No.5 は供試体右上部の巨視的な亀裂が 2 つに分岐

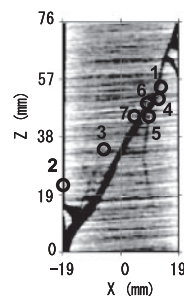


Fig.5 Comparison between a CT image of the XZ plane that $Y=0\text{ mm}$ (the central section of the specimen) and all located AE sources projected onto the plane.

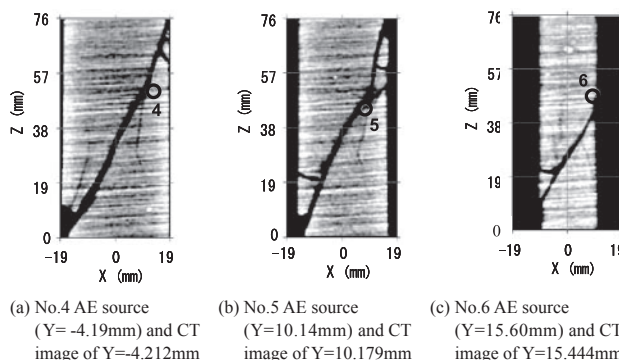


Fig.6 Comparisons between a CT image of the XZ plane close to a Y-coordinate of a located AE source and its projection onto the plane.

する分岐点近傍に位置することがわかる。Fig. 6 (c) を見ると、震源位置が円柱形供試体の中心部からずれているために CT 画像の幅が狭くなり両側の供試体のない部分は黒くなっているが、震源 No.5 は、巨視的な亀裂が供試体表面に現れた位置に対応することがわかる。

残りの 4 個の AE 震源については CT 画像の亀裂位置とこのようなよい一致は見られなかった。しかし Fig. 5 と Fig. 6 からわかるように、巨視的な亀裂は Y 軸にほぼ平行で Y 軸のどの断面をとっても XZ 面上でその位置と方向は大きく変化しない。従って Fig. 5 からわかるように、残りの 4 個の AE 震源は巨視的な亀裂の概ね近傍に位置しているといえる。

以上のように震源決定された 7 個の AE 震源のうち 3 個は CT 画像上の巨視的な亀裂の位置と 3 次元的により一致を示し、他の 4 個も巨視的な亀裂の概ね近傍に位置することから、これらの AE は巨視的な亀裂、あるいは巨視的な亀裂から分岐して派生した微小亀裂に対応するものと思われる。このように、間隙流体圧の上昇に伴う岩石の破壊においても、亀裂の発生に伴って震源決定できるエネルギーの大きな AE が発生することがわかった。

3・5 断層面解析による AE 発生メカニズムの検討

3・5・1 断層面解析の理論と方法 AE の発生に伴ってセンサーに伝播してくる P 波初動は震源に向うか、遠ざかるかによってそれぞれ押し波 (Compressional)、引き波 (Dilatational) のいずれかの極性を有している。引張破壊や爆発的な破壊 (explosion 型破壊) の場合には、すべての観測点で押し波が観測される。これとは逆に空隙や空洞への陥没や真空管の破裂のように周辺の媒体が内側に引っ張り込まれるような破壊 (implosion 型破壊) では、すべての観測点で引き波の初動が観測される。

一方 Fig. 7 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、

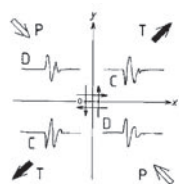


Fig. 7 Conceptual diagram of fault plane solution for radiation pattern of P-wave.

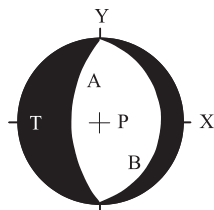
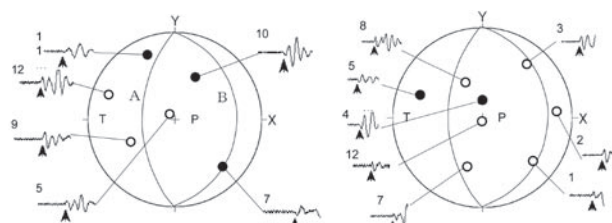


Fig. 8 Radiation pattern of AE associated with shear fracture along a plane parallel to the macroscopic fracture plane under the stress condition of the experiment. Compressional P-wave initial motion is observed in the direction of the black regions, while dilatational one is observed in that of the white region. (Lower hemisphere projection on Schmidt net.)

これに伴って AE が発生した場合、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 波が伝播してくる。従って、Fig. 7 のように押し引きの分布が交互に表れる AE は、せん断破壊に伴って生じたものとみなすことができる。せん断破壊の場合、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で、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逆解析的に求めることができる。すなわち、引き波と押し波の分布を区切る 2 つの線 (Fig. 7 の X 軸と Y 軸) のいずれかがせん断破壊面の方向と推定できる。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。Fig. 7 は 2 次元の概念図であるが、震源から各観測点への射出角と方位角を計算し、シュミット・ネットなどのステレオ・ネット上で初動の押し引き分布を整理することにより、同様の解析を 3 次元的に行うことができ、このような解析を断層面解析という⁹⁾。

3・5・2 巨視的破壊面に平行なせん断破壊で生じる AE の断層面解 さて、Fig. 5 の CT 画像で密度が低い黒く見える巨視的破壊面を、供試体を対角線で横切る XZ 断面に垂直な平面とみなせば、巨視的破壊面は走向 Y 方向で X 方向から傾斜 63.4 度の平面となる。Fig. 8 は、最大圧縮主応力が供試体の軸方向に作用する状態でこの面に平行な平面に沿うせん断破壊が生じたときに発生する AE の P 波初動の押し引き分布を、シュミット・ネットの下半球投影で示したものである。この図では円の中心が鉛直 (Z) 方向を、円の外周が水平方向を表すが、震源から白く塗りつぶした方向 (射出角と方位角) にあるセンサーでは引き波が、黒く塗りつぶした方向にあるセンサーでは押し波が観測される。白と黒の領域を区分する 2 つの節面 A, B のうち、A が上述の巨視的破壊面の方向を、B がそれに共役な直交する節面を表す。

さて今回のような岩石供試体の破壊実験で共役な 2 つのせん断面が生じる場合、内部摩擦角の存在により、A が巨視的破壊面であれば、これに共役な面は A 面に直交する B 面ではなく、YZ 面に関して A 面と対称なより大きな傾斜の平面になるはずである。しかし断層面解析では Fig. 7 で説明したように、モーメントの釣り合いを保つため 2 つの共役面は直交すると仮定しているの



(a) No. 1 (Inconsistent with the radiation pattern shown in Fig. 8.) (b) No. 2 (Almost consistent with the radiation pattern shown in Fig. 8.)

(c) No. 3 (Almost consistent)

(d) No. 6 (Almost consistent)

Fig. 9 Fault plane solutions of Nos. 1, 2, 3 and 6 AE sources in comparison with the radiation pattern shown in Fig. 8.

A 面の共役面は A 面に直交する B 面となる。このような 2 つの直交する節面を定めた場合、断層面解析では図中の P の文字の位置がこのせん断破壊面を発生させる最大圧縮主応力の作用方向、T の文字の位置が最小圧縮主応力の作用方向となる。供試体実際に作用している最大及び最小応力の方向は鉛直方向と水平方向であるから P 及び T の文字はそれぞれ円の中心と外周円上に位置するはずである。しかし、上述の 2 つの節面が直交するとの仮定のために、断層面解析で得られる P 軸及び T 軸の方向は ϕ を内部摩擦角として $\phi/2$ だけ、すなわち、この場合、巨視的断層面の傾斜から計算すると $\phi = 36.8$ 度であるから、 $\phi/2 = 18.4$ 度だけずれている¹⁰⁾。

3・5・3 観測された AE の断層面解 このような節面や P 軸、T 軸の方向に関するずれをとりあえず無視して、Fig. 5 に震源を示した AE が、CT 撮影で確認された巨視的破壊面に沿うせん断破壊に伴って発生したと見做せるかどうかを検討する。Fig. 9 (a) (b) (c) (d) に、シュミット・ネットの下半球投影で示した震源 No.1, 2, 3, 6 の断層面解析結果を示す。図中の数字はセンサー番号を、図中の○と●の位置は、震源からみたセンサーの方位のシュミット・ネットへの投影位置を示す。センサーで受振した P 波の初動が、図上で上を向いている場合は引きと判断して○で、下を向いている場合は押しと判断して●で示した。押し引きは、実験前にセンサーを厚みのある鉄製円盤の下面に貼って上面に鉄球を落下させ、そのときに観測された P 波の初動が下向きであったため、下向きを押しとした。

Fig. 9 (a) に示した震源 No.1 の押し引き分布を Fig. 8 と比較すると、引き波 (○) が観測されるはずのセンサー 10 と節面上にあり初動の押し引きが不明瞭になるはずのセンサー 7 で比較的明瞭な押し波 (●) が観測されるだけでなく、押し波 (●) が観測されるはずのセンサー 9 と 12 では逆に引き波 (○) が観測されており、上述の巨視的せん断面に平行なせん断破壊に伴う AE とはいえないことがわかる。また震源 No.2 は、引き波 (○) が観測されるべきセンサー 4 で押し波 (●) が観測され、逆に押し波 (●) が観測されるべきセンサー 2 で引き波 (○) が観測されている。しかし、少なくともセンサー 2 は節面に近い。同様に、震源 No.3 のセンサー 7 と震源 No.6 のセンサー 4 でも押し波 (●)

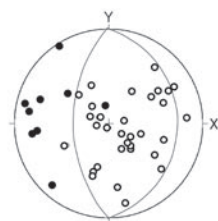


Fig.10 Composite fault plane solution obtained by superimposing those of Nos. 2, 3, 5, 6 and 7 AE sources. This is almost coincident with the radiation pattern shown in Fig. 8.

が観測されるべき位置で引き波 (○) が観測されているが、いずれも節面に近い。これらの節面に近い3点は、巨視的せん断面と少し斜交した面でAEが発生したと考える、あるいは、先に述べた断層面解析の仮定に基づく節面やP軸、T軸の方向のずれを考慮すれば、それほど大きな矛盾はないと言える。従って震源No.2, 3, 6は、震源No.2のセンサー4を除けば、Fig. 8とほぼ一致する押し引き分布が得られていると言える。またFig. 9には示していないが、震源No.4はNo.1と同じくFig. 8に一致しないが、震源No.5と7についてはFig. 8に一致する押し引き分布が得られた。

そこで震源No.1とNo.4を除き、Fig. 9に示した震源No.2, 3, 6に震源No.5と7の2個を加えた合計5個のAEイベントの断層面解を重ね合わせるとFig. 10が得られた。これらのAEは、震源No.2のセンサー4に対応する●印の1点を除けば、Fig. 8に一致するメカニズムで発生したといえることがわかる。

ここで検討した7個のAEは、多数のセンサーで初動が読み取れ震源決定のできるエネルギーの大きなAEであり、またそれらが実験後に巨視的せん断面に沿う位置で巨視的破壊の発生直前の短時間に発生していることに特徴がある。さらにこの7個のうち5個のAEが、供試体に作用している主応力のもとでの巨視的せん断面に平行なせん断破壊のメカニズムで説明できることから、今回の実験で観測された主要なAEは、その大半が巨視的せん断面を形成する過程の一連のせん断破壊で発生したといえる。

4. ま と め

地下の間隙流体圧の変化に伴うAEの発生を再現する最も基礎的な試験として、3軸応力下の均質なBerea砂岩供試体に間隙水圧を加圧して破壊し、AEを測定する実験を行った。また破壊した供試体をX線CTで観察し、造成された破壊面とAEの発生メカニズムを比較検討した。その結果を整理すると次の通りである。

- 1) 実験に用いたのと同じ岩石ブロックから採取した室内乾燥状態の3個の供試体に対して事前に排水条件で三軸試験を行って破壊規準を求め、今回の実験における供試体の応力経路と比較した。その結果、間隙水圧の上昇による供試体の巨視的破壊は、有効応力の低下により上述の破壊規準に抵触して発生したことで説明できた。このことは、水攻法などに伴う間隙流体圧の上昇で生じる岩盤の破壊とAEの発生は、モールの破壊規準とTerzaghiの有効応力理論で説明できることを示唆している。

- 2) 軸圧と拘束圧一定のまま間隙水圧だけをさらに上昇させたところ、軸ひずみは一定もしくはさらに圧縮の増大を示したが、横ひずみは減少し、体積ひずみは圧縮の増大から減少、すなわち膨張傾向に転じて破壊に至った。体積ひずみのこのような変化は、巨視的破壊に先立つ微小破壊の蓄積の開始を示しているものと思われ、間隙流体圧の上昇による貯留層の岩盤の破壊が、体積ひずみ計、傾斜計、陸上及び海底GPSなどによる体積ひずみ測定で予測できることを示唆している。

- 3) 供試体の破壊時にAEが発生し7個のAEの震源位置を決定することができた。さらにそのうち3個はCT画像上の巨視的な亀裂の位置と3次的によい一致を示すことが確認できた。このように、間隙水圧の上昇に伴う岩石の破壊においても、震源決定できるエネルギーの大きなAEが発生することがわかった。このことは、水攻法などに伴う間隙流体圧の上昇による貯留層の岩盤の破壊に対してもAEの観測が有用であることを示唆している。

- 4) これらのAE震源に対し、P波初動の押し引き分布に基づく断層面解析を行いその発生メカニズムを検討したところ、7個のうち5個のAEは巨視的せん断面に近い位置で発生し、供試体に作用している主応力のもとで巨視的せん断面に平行なせん断破壊のメカニズムを示していることがわかった。従って、今回の実験で観測された主要なAEは、その大半が巨視的せん断面を形成する過程の一連のせん断破壊で発生したといえる。またこのような結果は、水攻法などに伴う間隙流体圧の上昇による貯留層の岩盤の破壊に対しても、これまでに報告されている多くの事例¹¹⁻¹⁴⁾と同様、現地のAE測定によって破壊メカニズムの解析が可能であり、主応力方向や主応力値の大小関係が明らかにできることを示唆している。

以上のことから、AE測定、すなわち現地における微小地震観測は、水攻法による原油の2次回収など、間隙流体圧の上昇に伴う貯留層の挙動監視に有用であることがわかった。しかし実際の不均質な岩盤中の間隙流体圧の変化とAEの発生、あるいは貯留層の岩盤を満たした原油が水が置換していく際の流体の濡れ性(Wettability)の変化がAEの発生に与える影響などについては未解明な部分が残されており、さらに研究を進めて行きたいと考えている。

References

- 1) A. Jupe, R. Jone, S. Wilson, and J. Cowles, J.: Proc. of 2000 SPE (2000), SPE63131.
- 2) K. Tezuka and T. Tamagawa: Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology **69** (2004), 635-646.
- 3) P. McGillivray: CSEG Recorder, **30** (2005), 5-9.
- 4) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: *Ganseki Ritigaku Nyumon* (3rd. ed.), (University of Tokyo Press, Tokyo, 1991), pp.268-271.
- 5) Sekiyu Gakkai: *Sekiyu Giten*, (Asakura Shoten, Tokyo, 1966), pp. 96-104.
- 6) Sekiyu Gijutsu Kyoukai: *Sekiyu Kougyou Binran*, (Sekiyu Gijutsu Kyoukai, Tokyo, 1983), pp.47-49.
- 7) T. Ishida, H. Fukui, M. Taguchi, K. Suemune and Y. Mizuta: Journal of MMIJ, **123** (2007), 458-466.
- 8) Y. Nakayama, T. Ishida, Y. Ohike and Y. Mizuta: Journal of the Japan Society of Civil Engineers, **715/III-60** (2002), 345-356.
- 9) K. Kasahara: *Zishin no Ritigaku*, (Kajima Institute Publishing, Tokyo, 1983), pp. 38-44.
- 10) N. Yamakawa: Journal of Physics of the Earth, **10** (1971), 347-355.
- 11) J. W. Gephart and D. W. Forsyth: Journal of Geophysical Research, **89** (1984), 9305-9320.
- 12) H. Moriya and H. Niitsuma: Progress in Acoustic Emission, VII (1994), 481-486.
- 13) K. Tezuka and H. Niitsuma: Engineering Geology, **56** (2000), 47-62.
- 14) H. Moriya, S. Miyano, H. Niitsuma and R. Baria: Geothermal Resources Council Transactions, **26** (2002), 229-233.