

11 – 12 室内実験における流体圧入で誘発される微小破壊の研究 Acoustic emission activity induced by fluid injection in the laboratory experiment

京都大学防災研究所, 直井誠

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Makoto Naoi

本稿では、流体と破壊の関係を調べるために行った室内水圧破碎実験について報告する。一連の研究は、シェールガス・オイル開発を念頭に置いた資源開発の効率化を目的としているが、流体起因で発生した破壊を対象としていることから、群発地震に対して何らかの知見が得られる可能性がある。

第 1 図に示すように、65 x 65 x 130 mm の直方体形状に整形した乾燥状態の供試体中央に穿孔した破碎孔に、紫外線照射下で発光する蛍光剤添加樹脂を圧入して水圧破碎を行った。試験後に供試体を切断し、その断面や薄片を用いて造成亀裂を含む流体浸入域を観察するとともに、破壊の時間発展を、供試体周囲に貼り付けた微小破壊センサ (AE センサ) の解析を通じて調べることができる。これまでに Eagle Ford 頁岩¹⁾ や黒髪島花崗岩^{2),3)} などを用いて実験を行ってきた。流体浸入域と AE 震源分布の観察から、Eagle Ford 頁岩を用いた実験では破碎孔から鉛直方向に伸びるシンプルな亀裂が造成されるのに対し (第 2 図)、黒髪島花崗岩を用いた場合には三次元的に流体が浸入し、その中心部で鉛直方向に二次元的広がりを持つ亀裂面が造成されたことが示唆される (第 3 図)。

AE センサの記録はその指向性が公表されていない、周波数特性が複雑でかつ設置状況によって変化するといった困難があり、その波形記録を用いた解析は簡単ではない。本研究ではこれらの困難を解決する手法を考案し、モーメントテンソル、地震モーメント、コーナー周波数推定を実現するとともに、得られた震源パラメータと観察された流体浸入域・亀裂形状から亀裂造成過程について検討を行った。

モーメント・テンソル推定においては、AE 波形記録から実際にセンサに入射した波の振幅を推定して解析に用いるが、これには AE センサの指向性とその相対感度を推定・補正する必要がある。本研究では、半円筒形の金属製ブロックを用意し、これを用いて AE センサの指向性を測定した⁴⁾。また、AE センサは固定方法によっては貼り付け毎に感度が顕著に変化し、このことが解析の誤差要因となり得る。本研究では水圧破碎実験直前に、個々の AE センサから他のセンサに向けて波を発振する音波透過試験を実施し、得られた振幅値から個々のセンサの相対感度を逆解析することで、すべての実験における全センサの相対感度を推定し、振幅記録補正に用いた。また、同じ音波透過試験のデータを用いて供試体の減衰異方性を推定し、これを補正に用いた。

モーメント・テンソルは、手動¹⁾、あるいは深層学習技術^{2),3)}を用いて読み取った P 波初動極性・振幅値から逆解析で推定した。解析の結果、花崗岩、頁岩ともに引張成分が卓越する解が支配的という結果が得られた。特に頁岩においてはほぼ全ての解が円孔周りの応力場から理論的に予想される、圧縮軸沿いに破壊面を持つ引張亀裂に対応することが示された¹⁾。花崗岩でも引張型の解が支配的であったが、特に主亀裂造成が始まるまでは、様々な方向を向いた引張亀裂が生じたことが確認された。主亀裂造成が始まると、理論的に予想される方位の引張亀裂が多数発生すると同時に、せん断型のイベントが多数発生するといった、顕著な時間変化を示した (第 4 図)。このような違いは、供試体が内包する既存亀裂と流体の相互作用の強さの違いに起因すると考えられる。

次に、個々の AE 震源の絶対規模、すなわち地震モーメントを推定した。AE センサの周波数特性はメーカーから公表されているものの、実際の特徴は設置方法に依存する。本研究ではレーザードップラー速度計を用いることで、実際の破碎実験で採用した手法でセンサを固定した場合の周波数特性を評価した。これに加えて、モーメント・テンソル解析時にも補正したセンサ指向性・個々のセンサの相対感度・供試体の減衰特性を補正したうえで、個々の AE センサの記録から P 波の地動スペクトルを評価し、これに理論スペクトルをフィッティングして地震モーメント及びモーメントマグニチュード (M_w) を評価した。得られた M_w の範囲は -9.1 から -6.3 である。なお、通常、地震計を用いた地震モーメント推定で解析に用いられる剪断型破壊の Radiation Pattern 係数は仮定できないため、本研究ではモンテカルロ法により shear-tensile モデルに基づいた各モーメントテンソル解のタイプに対応する平均的 Radiation Pattern 係数を推定して解析に用いている。

最後に、AE センサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能な Multiple Empirical Green Function 法を用いて個々のイベントのコーナー周波数 (f_c) を推定したところ、全部で 1053 イベントに対して 68.4–1208.0 kHz の値を得た。この結果の解釈においては、測定帯域が狭いこと、剪断型の円形クラックモデルを用いた議論ができないこと、AE の震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかることなど、誤った解釈につながる問題が多数存在するため慎重な議論が必要であるものの、1) 約半数はせん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的な M_0f_c 関係を持つイベントであった、2) 残る半数は上記スケールリング則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントであった、という結論が得られた (第 5 図)。震源における高い間隙流体圧の存在が、低周波成分が卓越するイベントの発生に寄与したと考えられる。

直井 誠

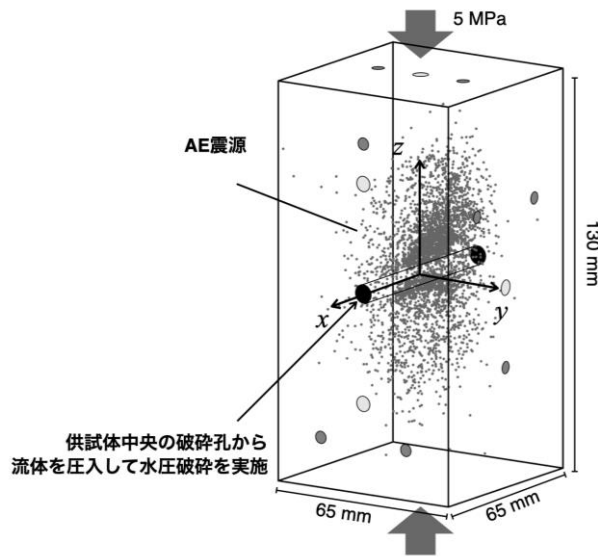
NAOI Makoto

謝辞

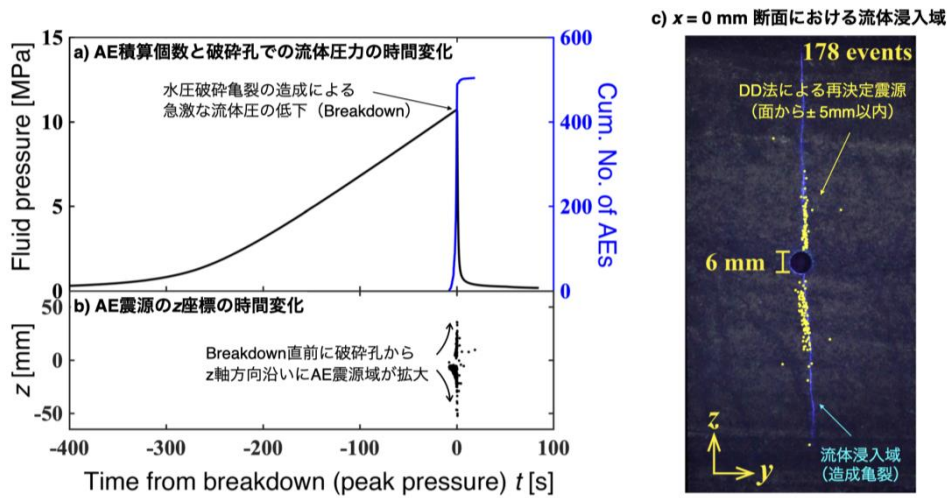
本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (現：独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構) (JOGMEC) の委託研究として実施しました。また、科研費 (16H04614; 21H01191)、京都大学教育研究振興財団、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (第 2 次) の援助を受けました。

参考文献

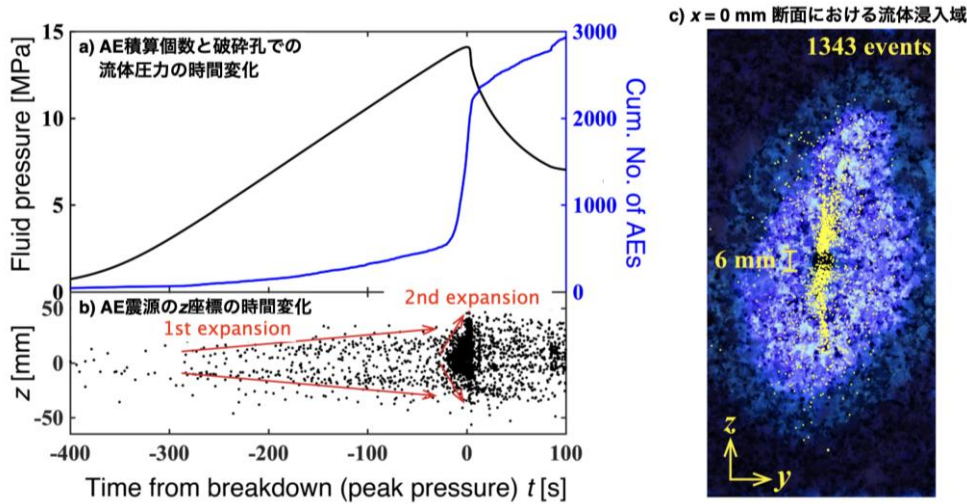
- 1) Naoi et al. (2020), *Geophysical Journal International*, **222**, 769–780. Tensile dominant fractures observed in hydraulic fracturing laboratory experiment using eagle ford shale.
- 2) Tanaka et al. (2021), *Geophysical Journal International*, **226**, 493–510. Preparatory acoustic emission activity of hydraulic fracture in granite with various viscous fluids revealed by deep learning technique.
- 3) Naoi et al. (2022), *Geophysical Journal International*, **231**, 408–425. Source parameter estimation of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory
- 4) Yamamoto et al. (2019), *Geophysical Journal International*, **216**, 1507–1516. Moment tensor analysis of acoustic emissions induced by laboratory-based hydraulic fracturing in granite.



第 1 図 蛍光観察と AE 計測による水圧破砕亀裂造成プロセスの可視化実験. 上下方向に 5 MPa の一軸圧縮をかけた状態で供試体中央部の破砕孔から、紫外線照射下で発光する樹脂を注入して水圧破砕を生じさせる。
 Fig. 1 Experimental setting of Hydraulic fracturing. The fracture generation process is investigated by AE measurement and direct observation using fracturing fluid (resin) mixed with a fluorescent substance. Under uniaxial compression of 5 MPa in the vertical direction, the resin that emits bluish-white light under UV irradiation is injected into the hole in the center of the specimen to induce hydraulic fracturing.

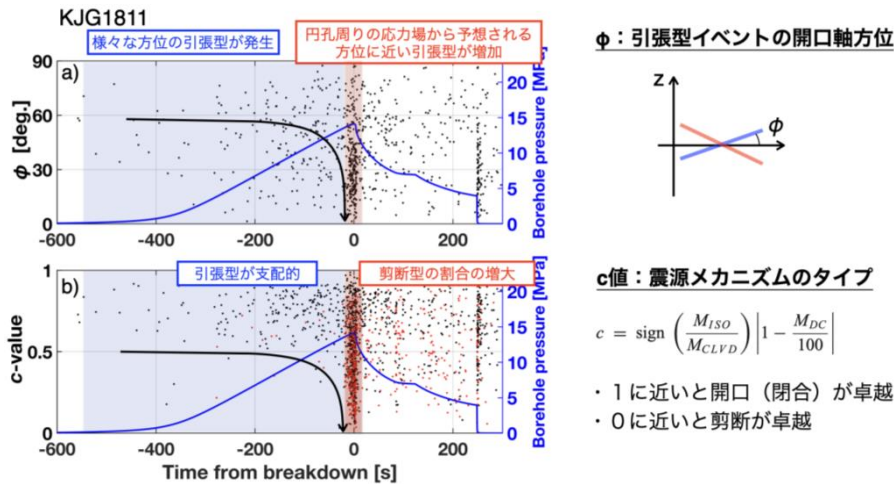


第 2 図 イーグルフォード頁岩における実験結果の例¹⁾. a) 破砕孔での流体圧と AE 積算個数の時間変化. 時刻の原点は破砕時刻 (破砕孔圧力がピークに達した時刻) に対応している. b) AE 震源の z 座標の時間変化. c) 破砕後の供試体断面を紫外線照射下で観察したもの. 青白く発光している部分が流体の浸入域に対応する. 黄色の点は, 断面付近に求まった微小破壊の震源. 主破壊 ($t=0$) 開始直前に破砕孔付近で AE 活動が始まり, 造成亀裂に対応する薄い二次元状分布を描き出しながら, 加速度的に活動域が拡大している。
 Fig. 2 Example of experimental results with an Eagle Ford Shale sample¹⁾. a) Time history of fluid pressure at the fracturing hole and the cumulative number of AEs. The origin time corresponds to the timing of main fracture generation (the time when the fluid pressure reaches the peak value). b) Temporal variation of the z-coordinates of the AE hypocenters. c) Photograph under UV irradiation for the specimen after the fracturing experiment (cross-section view). The bluish-white parts correspond to the fluid penetration area. The yellow dots indicate the hypocenters of the AE events. AE activity started around the hole immediately before the main fracture generation ($t=0$), and the activity area rapidly expanded, drawing a thin two-dimensional distribution corresponding to the induced fracture.



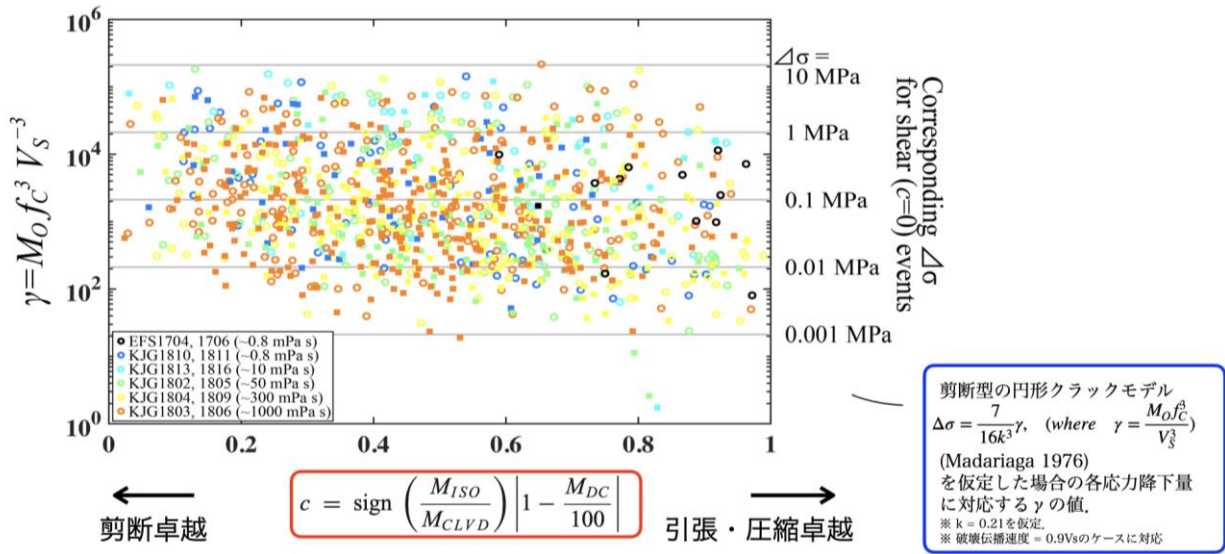
第 3 図 黒髪島花崗岩供試体における実験結果の例²⁾。実験開始後、破砕孔周辺に流体が徐々に浸透することに伴って三次元的に AE 活動が広がり（1st expansion phase）、破砕の数秒前から主亀裂造成に対応する二次元状 AE 分布の拡大（2nd expansion phase）が生じたと解釈している。

Fig. 3 Example of experimental results with a Kurokami-jima granite specimen²⁾. After starting fluid injection, the AE activity initiated and expanded three-dimensionally (1st expansion phase). A new planar AE distribution emerged from the borehole at $t \sim -20$ s and expanded along the maximum compression axis (2nd expansion phase). The first phase was likely induced by fluid penetration into pre-existing microcracks, such as grain boundaries, and the second phase likely corresponded to the main fracture formation.



第 4 図 黒髪島花崗岩供試体の実験で観察されたモーメント・テンソル解の時間変化^{2,3)}。a) 引張型イベントの開口（閉合）軸の時間変化。はじめは様々な方向の破壊が発生していたが、主破壊の造成（ $t=0$ ）前後には、鉛直方向の亀裂が水平方向に開口するタイプの破壊（円孔周りの応力場から予想される方向の破壊）が多数発生した。b) 震源メカニズムのタイプの指標（ c 値）の時間変化。黒点は開口成分を持つもの、赤点は閉合成分を持つものに対応している。はじめは引張型が支配的だが、主破壊造成前後で剪断型の割合が急増したことがわかる。

Fig. 4 Temporal changes in moment tensor solutions for an experiment of a Kurokami-jima granite specimen^{2,3)}. a) Temporal changes in ϕ , the smaller angle between the y-axis and the two candidates of crack-opening axes of each MT solution. In the initial part of the experiment, tensile events in various directions occurred. Around the main fracture generation ($t=0$), many tensile events which opened horizontal directions occurred. This type of focal mechanism corresponds to the theoretically expected stress field around the hole. b) Temporal changes in the c -values for the obtained MT solutions (only $c \geq 0$). The black and red dots indicate the solutions with tensile and compressive components, respectively. The tensile events were dominated in the initial part of the experiment, whereas the fraction of shear-type events increased around $t \sim 0$.



第5図 震源メカニズムのタイプ (c 値) と γ 値の関係³⁾。丸は引張成分を持つイベントに対応する。 γ 値は破壊の規模と卓越周波数の関係を表す指標で、せん断破壊の場合には、 γ 値から計算できる $\Delta\sigma$ (図中右縦軸) が 0.1–10MPa の範囲に収まることが知られている (応力降下量一定則)。本実験で γ 値が得られたイベントの半分程度はこの範囲に収まるが、残りの半分はそれより 1–2 桁小さな値を示している。

Fig. 5 Relationship between c -values and γ -values. Open circles indicate events with a tensile component, and filled squares indicate a compressive component. γ -values represent the relation between source size and dominant frequency of AE events. Many previous studies reported that the stress drop $\Delta\sigma$ that can be calculated from γ -values have values of 0.1–10 MPa for shear events (constant stress drop scaling). Although half of our results showed values in the range, the remaining showed much lower ones.