

## 室内水圧破砕実験で生じる微小破壊の震源メカニズム推定 Focal mechanisms of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○直井誠・田中壘・陳友晴・有馬雄太郎

○Makoto NAOI, Rui TANAKA, Youqing CHEN, Yutaro ARIMA

Hydraulic fracturing plays an important role in resource development. In this study, we conducted hydraulic fracturing experiments on Eagle Ford shale and Kurokami-jima granite samples in a laboratory. We measured acoustic emissions (AEs) during fracturing and estimated their moment tensors by carefully correcting sensor characteristics. To analyze a large number of AE events, we introduced a convolutional neural network technique in the moment tensor analysis. The resultant solutions indicated that tensile events were dominant for both the samples, although complicated temporal variation was observed only for granite, probably reflecting significant interactions between the fluid and preexisting cracks.

### 1. はじめに

シェールガス・オイル開発をはじめとする非在来型資源開発においては、水圧破砕によって透水性の低い岩盤を破砕し資源の流路を確保する。破砕の進展状況はしばしば微小誘発地震のモニタリングで行われるため、亀裂造成プロセスと誘発地震の関係を調べることは重要である。また、実際の生産現場では、透水性を長期間保持するため、破砕後に亀裂支持材（プロパント）を注入して、亀裂の開口を維持する。そのため、水圧破砕で十分な開口を伴う破砕が生じるかは重要である。

水圧破砕の古典理論においては、最大圧縮軸沿いの引張破壊が予想される（e.g. Hubbert and Willis 1957）のに対して、実際の生産現場や室内実験では、せん断型が卓越するという報告が多くなされている（e.g., Maxwell and Cipolla 2011）。本研究では、黒髪島花崗岩とイーグルフォード頁岩の供試体を用いて室内水圧破砕実験を実施し、センサの特性を丁寧に補正した上でモーメントテンソル（MT）解析を実施した。黒髪島花崗岩供試体に関しては、1 供試体あたり数千から1 万を超える大量の AE が発生し、これらの MT 解を効率よく評価するために、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による極性読み取り手法を導入した。

### 2. 実験手法

実験は、 $65 \times 65 \times 130$  mm に整形した角柱型の供試体に対し、供試体長手方向に 5 MPa の一軸載荷を加えた状態で実施した。供試体中央部に設け

た直径 6 mm の破砕孔に紫外線照射下で発光する樹脂（粘度 0.8 mPa·s）を圧入して水圧破砕を行った。破砕後の供試体を加熱し、供試体内部に浸入した樹脂を固結させることで、供試体断面及び薄片上で、造成亀裂の形状とその周囲の流体浸入域を観察できる（Chen et al. 2018）。イーグルフォード頁岩に対しては 3 供試体の実験を実施した（Naoi et al. 2020）。黒髪島花崗岩供試体においては、増粘剤を添加し、流体粘度を約 10, 50, 300, 1000 mPa·s に調整した破砕流体を用いての実験も行い、各粘度に対して 2 供試体ずつ、合計 10 供試体の実験を実施した。

試験中に生じる AE は、供試体に設置した高感度・広帯域の M304A センサ 16 個、共振型（共振周波数約 550 kHz）センサ（Pico）8 個を用い、10 MHz 連続収録した。得られた AE データからイベント検出、走時検出を自動処理で実施し、震源決定を行い、AE のイベントカタログを作成した。

得られた個々の AE イベントに対し、P 波の初動極性と振幅値から逆解析によってモーメントテンソル解の推定を行った。AE センサは地震型とは異なる複雑な特性を持ち、また供試体への貼り付け状態によって感度が増減するため、実際の設置状態における個々のセンサの特性を推定・補正して解析をおこなう必要がある。そのため、破砕試験直前に、あるセンサから他の 23 個のセンサに対して音波を発信し、得られたデータを用いて個々のセンサの感度を推定した結果を用いて、個々の設置状態における感度の違いを補正して解

析を行った。

イーグルフォード頁岩では各実験で 477–534 個程度の AE が発生し、これらの P 波初動極性を手動で読み取り、各供試体に対して 118–134 個の MT 解を得た (Naoi et al. 2020)。黒髪島花崗岩供試体では、1 実験あたり 3755–12872 個という大量の AE が発生したため、P 波周辺 150 サンプル分の波形を入力とし、その波形の初動極性を 0 (引き) から 1 (押し) の連続量で出力する CNN を用いた自動処理を採用した。SN 比が良いデータの極性を手動で読み取って得た 68,152 個の訓練データで学習を実施し、合計 1,366,118 個の極性読み取りに成功した。これらを用い、最終的に 54,727 個の MT 解を得た。

### 3. 結果と議論

MT 解析の結果、花崗岩、頁岩ともに **Tensile type** が支配的であるという結果が得られた。特に頁岩においてはほぼ全てが水圧破碎の古典理論から予想されるような、圧縮軸沿いに破壊面を持つ引張亀裂による AE であることが示唆された。花崗岩でも **Tensile type** が支配的であったが、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おこり、主亀裂造成の開始から、その進展による流体圧の急降下の直前までには、古典的理論から予想される方位の引張亀裂が支配的になると同時に、せん断型のイベントが多数発生するなどの、顕著な時間変化を示した。イーグルフォード頁岩と黒髪島花崗岩の間で見られたこのような違いは、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。

### 4. まとめ

室内水圧破碎実験で得られた AE イベントにモーメントテンソル解析を適用したところ、岩種に

よってその特徴が大きく異なることがわかった。このような違いは、既存亀裂と流体の相互作用の強さによって生じていると考えられる。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 16H04614 と、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の助成を受けて実施しました。

### 参考文献

- Hubbert, M.K. & Willis, D.G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing, *Trans. Soc. Pet. Eng. AIME*, 210, 153–168.
- Maxwell, S.C. & Cipolla, C., 2011. What does microseismic tell us about hydraulic fracturing?, *Soc. Pet. Eng. ATCE, Denver, CO, SPE146932*, doi: 487 10.2118/146932-MS.
- Naoi, M., Chen, Y., Yamamoto, K., Morishige, Y., Imakita, K., Tsutumi, N., Kawakata, H., Ishida, T., Tanaka, H., Arima, Y., Kitamura, S. & Hyodo, D., 2020. Tensile-dominant fractures observed in hydraulic fracturing laboratory experiment using Eagle Ford shale, *Geophys. J. Int.*, 222, 769–780, doi: 10.1093/gji/ggaa183.
- Chen, Y., Naoi, M., Tomonaga, Y., Akai, T., Tanaka, H., Takagi, S. & Ishida, T., 2018. Method for visualizing fractures induced by laboratory-based hydraulic fracturing and its application to shale samples, *Energies*, 11, 1976, doi: 10.3390/en11081976.