講 演
 Lecture

水圧破碎フラクチャーの可視化技術*

陳 友晴^{**,†}・直井 誠^{***}・石田 毅^{***}・赤井 崇嗣^{****}・黒澤 功^{****}・高木 是^{****}

(Received August 19, 2017 ; accepted September 27, 2017)

A novel method of visualizing fractures induced by hydraulic fracturing

Youqing Chen, Makoto Naoi, Tsuyoshi Ishida, Takashi Akai, Isao Kurosawa and Sunao Takagi

Abstract : To investigate the characteristics of fractures and surrounding region induced by the hydraulic fracturing, a new method to visualize hydraulically induced fractures in the laboratory experiment was developed. For this purpose, a thermosetting acrylic resin, methyl methacrylate, mixed with a fluorescent paint was used as the fracturing fluid. The resin was able to fix within the specimen by heating just after the fracturing experiment, and then cut sections of the specimen were observed under ultraviolet light irradiation. In this way, it is expected that the hydraulically induced fractures and the surrounding regions will be detected because the induced fractures filled with the resin should emit light, while the other parts will not.

As a result, the hydraulically induced fractures, which were filled and fixed with the resin, are successfully observed in the shale specimens. The configuration of bi-wing fractures extended from the injection hole along the maximum stress direction is clearly observed under the uniaxial compressive condition. Detailed microscopic observations show that the main fractures are tortuous and are accompanied by many thinner ramified fractures. Additionally, fractured regions where the resin penetrates significantly are observed around the main fractures. These induced fractures and fractured regions are considered to be the stimulated region in which permeability is improved.

Keywords : hydraulic fracturing, shale gas, fracture pattern, stimulated reservoir volume (SRV), laboratory experiment, microscopic observation

1. はじめに

近年、拡大するエネルギー需要の影響を受けて、非在来型エネルギー資源の 1 つであるシェールガスが注目を集めている。シェールガスの貯留岩である頁岩は、微小な粒子で構成される堆積岩であり、通常その浸透性は著しく低く、地下からのガス回収が困難であった。ガス生産のためには、貯留岩を破碎してガスの通り道となる人工的なフラクチャーをつくる必要がある。そのためには、地下の岩体に高圧の水（液体）を注入してフラクチャーを生じさせる水圧破碎法が用いられる。近年の水平坑井掘削技術の発達

に加え、1 本の坑井内の複数箇所でも水圧破碎を行う多段階水圧破碎技術の発達によって、生産の低コスト化が進み、北米地域を中心として本格的な開発が進められている。シェールガスを含む非在来型天然ガス資源であるタイトガスは、世界中の広範な地域に賦存すると考えられ、これらの効率的な開発はエネルギー問題の解決のひとつの鍵となる。

効率的なガス生産のためには、水圧破碎によって造成されたフラクチャーが、貯留岩となる頁岩層中でどのように進展し、どのような状況になるのか、フラクチャー特性に関する詳しい情報が必要である。しかしながら、これらの進展したフラクチャーを原位置で直接観察することは不可能であり、その状況はよく分かっていない。通常の生産現場では、フラクチャーの進展状況は、水圧破碎の際に発生する地震波（マイクロサイスミック）の解析によって評価されるが、解析の結果と実際のフラクチャー進展を比較、検証できないことから、不明瞭な点も多く残っている。さらに、水圧破碎によって貯留層中のどの程度の領域（ボリューム）が刺激を受けて生産に寄与するのかを見積もる必要もある。これは、坑井刺激された貯留層容積 (SRV, stimulated reservoir volume) として検討されるが、実運用

* 平成 29 年度 6 月 15 日、平成 29 年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門シンポジウム「プロジェクト価値最大化に向けて～フィールドライフを通じての技術的アプローチ～」で講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Technical approaches through field life for maximizing project value" held in Tokyo, Japan, June 15, 2017.

** 京都大学大学院エネルギー科学研究科 Graduate School of Energy Science, Kyoto University

*** 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University

**** 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

† Corresponding author : E-Mail : chen@energy.kyoto-u.ac.jp

上はマイクロサイスミックの発生した領域とみなされることから、実際のフラクチャー進展状況と対比されているわけではない。

そこで、これらの問題を解決する一助となることを目指し、実験室規模で水圧破碎実験を行い、造成されたフラクチャーの状況を詳細に検討することができるフラクチャーの可視化技術の開発を試みた。

2. フラクチャーの可視化

2.1 概要

フラクチャーの可視化には、蛍光観察法^{1), 2)}と呼ばれる手法を用いることとした。蛍光観察法とは、アクリル樹脂のモノマーである熱硬化性のメチルメタアクリレート (MMA, methyl methacrylate) 中にあらかじめ蛍光剤を混入しておき、岩石供試体中の割れ目や孔隙に MMA を浸透させ、加熱によって供試体中に固定し、その後観察面を切り出して紫外線照射のもとで観察することにより、割れ目や孔隙を発光させて可視化し観察する手法である。観察面の切り出しが必要なため非破壊検査法ではないものの、詳細な観察ができることから、堆積岩中の風化の評価³⁾や花崗岩の破壊進展の解析^{4), 5)}に実績があり、石油天然ガス関連の分野では貯留岩中の間隙構造の可視化⁶⁾などに応用されている。岩石中の割れ目や孔隙に MMA を浸透させるには、MMA を入れた容器の中に供試体を浸し、真空チャンバー内で減圧浸透させる。この方法を用いると、花崗岩中の雲母の劈開に沿う微小な割れ目にも MMA が十分浸透し、可視化される¹⁾。また、観察面の切り出しの前に樹脂を固定する処理が完了していることから、切り出しの際に発生する割れ目などが可視化されてしまうことがないのが、この手法の特徴である。MMA の固化はおおよそ 80℃ で起こるため、加熱による割れ目形成の影響についても大きくない。

蛍光観察法を適用した水圧破碎フラクチャーの観察手法としては、破碎試験を行った後の供試体を、蛍光剤を混入した MMA に浸し、供試体外部から内部のフラクチャーへ MMA を浸透させ固定することでフラクチャーの可視化を行い、観察する手法が考えられる^{7)~10)}。しかしながら、この方法では、水圧破碎によって造成されたフラクチャーと既存亀裂とを区別することができず、また、フラクチャー周辺の水圧破碎による影響領域とそれ以外の影響のなかった領域とを区別することもできない。そこで、これらの問題を解決する手段として、破碎流体として蛍光剤を混入した MMA そのものを用いて水圧破碎実験を行い、試験後、試験により供試体内部に到達した MMA を加熱によりその場で固定することでフラクチャーとその影響領域のみを可視化し観察する手法を開発した。

2.2 水圧破碎実験システム

水圧破碎試験を実施するため、流体圧入装置 (シリンジポンプ)、配管、流体置換用セル (ピストン)、圧力計、パッカーからなる破碎流体圧入系統および载荷試験機、高圧ハンドポンプ、小型ロードセル、供試体からなる応力载荷

図1 構築した実験装置の概略図

系統を有する試験システムを構築した (図1)。

供試体内部に挿入するパッカーは、配管で流体置換用セルを通してシリンジポンプと接続されており、シリンジポンプからの水の圧送によって供試体中に MMA を圧入することができるになっている。実験では、シリンジポンプから一定流量で水を吐出し、破碎流体圧を上昇させた。MMA の粘性は、実験を行った 25℃ で、およそ 0.8 mPa・s で、水よりも若干粘性が小さい液体である。なお、破碎流体圧入系統に流体置換用セルを組み込むのは、シリンジポンプの内部に MMA が浸入し機器を損傷しないようにするためである。

2.3 観察手法

試験後、すぐに供試体をあらかじめ 90℃ に昇温しておいた炉内に 1 時間、続けて炉内を 80℃ に調整して 12 時間以上静置することで、供試体内部に浸透した樹脂をその場に固定した。その後、供試体を切断し、切断面を紫外線照射のもとで観察を行った。紫外線照射により、MMA とともにフラクチャー内に固定された蛍光剤が発光し、フラクチャーを可視化することができる。また、より詳細な観察を行うために岩石薄片を作成し、通常の偏光顕微鏡観察に加えて、紫外線照射下での顕微鏡観察を行った。

3. 観 察 例

ここでは、実際の室内水圧破碎実験によって造成されたフラクチャーの可視化事例を示す。実験に利用した岩石は、宮城県石巻市井内産の三疊紀頁岩 (井内産頁岩)、北海道釧路市産の古第三紀頁岩 (釧路産頁岩)、米国産の Eagle Ford 頁岩である。頁岩は、岩石試験用にまとまった数量を整形できる状態で入手することは非常に困難であり、国産の 2 種の頁岩は、かろうじて安定的に入手が可能なものであることから実験に利用した。また、Eagle Ford 頁岩は、米国の石材業者より、露頭から得られたブロックを購入したものである。それぞれ堆積面に直交するようにコア抜きし、おおむね直径 75 ~ 85 mm、高さ 150 ~ 170 mm の円柱形に整形した (図2)。生産現場の水平坑井の状況を模して、供試体中央部に直径約 10 mm の円孔を堆積面方面に穿孔した。圧入孔とする円孔内にパッカー区間を 30 mm に調整した O リングパッカーを挿入し、流体を加圧し破碎を行う。なお、本稿で紹介する事例は、供試体の軸

図2 供試体寸法および観察面

方向にのみ载荷を行った一軸圧縮応力状態での実験の結果である。この応力状態では、载荷方向にフラクチャーの進展が期待される。

実験を行った結果、流体の圧入から一定時間経過後、流体圧の急激な低下が認められ、供試体表面から破碎流体(MMA)の漏出があったことから、供試体内にフラクチャーが進展し、破碎に至ったと判断した。実験後の供試体表面を観察すると、圧入孔よりおおむね载荷軸方向に進展するフラクチャーが確認された。そこで、供試体を圧入孔に直交する中央断面で切断し、造成されたフラクチャーの状況を観察した(図2)。また、この観察面内から作成した岩石薄片を用いて、落射紫外線照射装置を有する偏光顕微鏡を用いてより詳細に観察した結果も示す。

3.1 井内産頁岩

蛍光観察法で観察されるフラクチャーや孔隙は、紫外線照射によって青白く発光している部分であり、発光していない部分と明瞭に区別することができる。井内産頁岩は、P波速度がおよそ6.0 km/sとかなり緻密な供試体である。図3は、井内産頁岩を3 MPaの一軸圧縮応力状態で拘束し、水圧破碎実験を行った供試体(破碎圧力11.3 MPa)の中央断面の観察結果である。中央の圧入孔から、供試体の载荷軸に沿ってバイウイング(bi-wing)状に2本の水圧破碎フラクチャーが進展しているようすが観察される。さらに、図4は、確認されたフラクチャーを、岩石薄片を用いて拡大して観察した結果である。図3で巨視的には1本に見えるフラクチャーは、実際には分岐や収斂を繰り返しながら進展していることが明らかとなった。

3.2 釧路産頁岩

釧路産頁岩は、P波速度が3.5 km/s程度と、井内産頁岩に比べると若干多孔質な感じであり、構成鉱物の粒子に部分的に粗い砂粒が認められる供試体である。3 MPaの一軸圧縮応力状態で拘束し、水圧破碎実験を行った供試体(破碎圧力9.6 MPa)の中央断面の観察結果は図5のとおりであり、井内産頁岩と同様に圧入孔から载荷軸に沿ってバイ

図3 井内産頁岩中に観察された水圧破碎フラクチャー

図4 井内産頁岩中に観察された水圧破碎フラクチャーの進展状況(顕微鏡観察)

ウイング(bi-wing)状に2本の水圧破碎フラクチャーが進展しているようすが観察される。また、岩石薄片を用いて拡大観察すると、主亀裂は比較的屈曲した状況で伸展しており、ところどころに細い枝分かれが観察される。さらに、主亀裂まわりに幅1~1.5 mm程度の紫外線照射で比較的

図5 釧路産頁岩中に観察された水圧破砕フラクチャー

図7 Eagle Ford 頁岩供試体中に観察された水圧破砕フラクチャー

図6 釧路産頁岩中に観察された水圧破砕フラクチャーの進展状況（顕微鏡観察）

図8 Eagle Ford 頁岩中に観察された水圧破砕フラクチャーの進展状況（顕微鏡観察）

淡く発光する領域が観察され、この領域はより細かなフラクチャーと孔隙中に浸入した破碎流体によるものと推察された（図6¹¹⁾。

3.3 Eagle Ford 頁岩

ここで紹介する Eagle Ford 頁岩の実験は、当初 5 MPa の一軸圧縮応力状態で実験をはじめ、破碎流体圧入系統の耐圧 20 MPa まで流体を加圧したものの破碎に至らなかったため、その後徐々に载荷圧（一軸圧縮応力）を上昇させて破碎した供試体である。破碎時の一軸圧縮応力は 16.2

MPa、流体圧は 20.0 MPa であった。

供試体は、浸透性が異なる層がかなり細かな周期で互層をなすことが認められ、また堆積面に沿う不連続面や弱面が見受けられる。図7は、圧入孔に直交する中央断面の観察結果であるが、中央の圧入孔から供試体の载荷軸に沿って水圧破砕フラクチャーが進展しているものの、実験中に破碎孔周辺にも MMA が浸透したと推察され、画面下

方向には3本の破碎フラクチャーが認められる。また、フラクチャーを拡大して観察すると、既存の不連続面や弱面の影響を受けてフラクチャーが分岐して進展しているようすが明らかとなった（図8）。

4. おわりに

蛍光観察法を応用して、水圧破碎によって造成されるフラクチャーの状況とその影響領域を可視化し観察する手法の開発を試みた。破碎流体として蛍光剤を混入した熱硬化性のMMAを使用した結果、これまで直接観察することが困難であった水圧破碎によって岩石中に進展したフラクチャーの状況を可視化し、観察することに成功した。観察では、圧入孔からバイウイング（bi-wing）状に2本の水圧破碎フラクチャーが進展しているようすや、フラクチャーの分岐の状況、フラクチャー周辺に発達する破碎の影響と推察される領域などが確認された。これらのことから、実験室規模での実験において、水圧破碎によって進展するフラクチャーとその影響領域について、直接可視化し評価できる可能性が示唆された。

この成果を適用して、進展するフラクチャーの形状的な特徴の解析、実験中に得られる破碎音（AE, acoustic emission）の解析結果と観察結果の比較検討、シミュレーションによる破壊進展挙動と観察結果の比較検討などを進めている。

謝 辞

本稿の内容は、平成24年度 JOGMEC-京都大学共同研究「水圧破碎によるシェールの透水特性変化機構解明のための室内実験」、平成25、26年度 JOGMEC シェールガスに関する研究委託事業「頁岩内における水圧破碎亀裂の可視化のための研究」の研究成果の一部をまとめたものです。

また、実験に用いた釧路産頁岩の供試体は、釧路コールマイン株式会社より提供いただいた。ここに記して感謝申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 西山孝, 楠田啓, 北川元紀, 1990: 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出, *Journal of MMIJ*, **106**, 573-579.
- 2) Nishiyama, T. and Kusuda, H., 1994: Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins. *Int. J.*

Rock Mech. & Sci. Geomech. Abstr., **31**, 369-375.

- 3) Nishiyama, T. and Kusuda, H., 1996: Application of a fluorescent technique to the study of the weathering process. *Engineering Geology*, **43**, 247-253.
- 4) Nishiyama, T., Chen, Y., Kusuda, H., Ito, T., Kaneko, K., Kita, H. and Sato, T., 2002: The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite. *Engineering Geology*, **66**, 257-269.
- 5) Chen, Y., Watanabe, K., Kusuda, H., Kusaka, E. and Mabuchi, M., 2011: Crack growth in Westerly granite during a cyclic loading test. *Engineering Geology*, **117**, 189-197.
- 6) Wajima, T., Okuda, S., Chen, Y., Bessho, M. and Nishiyama, T., 2000: Observation of pore spaces and microcracks using a fluorescent technique in some reservoir rocks of oil, gas and geothermal fields in the green tuff region, Japan. *Resource Geology*, **50**(3), 191-200.
- 7) Bennour, Z., Ishida, T., Nagaya, Y., Chen, Y., Nara, Y., Chen, Q., Sekine, K. and Nagano, Y., 2015: Crack extension in hydraulic fracturing of shale cores using viscous oil, water, and liquid carbon dioxide. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**(4), 1463-1473.
- 8) Chen, Y., Nagaya, Y. and Ishida, T., 2015: Observations of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**(4), 1455-1461.
- 9) Ishida, T., Chen, Y., Bennour, Z., Yamashita, H., Inui, S., Nagaya, Y., Naoi, M., Chen, Q., Nakayama, Y. and Nagano, Y., 2016: Features of CO₂ fracturing deduced from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, **121**, doi:10.1002/2016JB013365.
- 10) Bennour, Z., Watanabe, S., Chen, Y., Ishida, T. and Akai, T., 2017: Evaluation of stimulated reservoir volume in laboratory hydraulic fracturing with oil, water and liquid carbon dioxide under microscopy using the fluorescence method. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, doi 10.1007/s40948-017-0073-3.
- 11) Chen, Y., Bennour, Z., Nagaya, Y., Yano, S., Suzuki, T., Ishida, T., Akai, T. and Takagi, S., 2015: An approach to observe fractures induced by hydraulic fracturing, *Proc. The 13th International Congress of Rock Mechanics*, 2015, Montréal, Canada, Paper 578.