

プロパント処理した岩盤亀裂の透水特性評価

菅野 巧^{1*}・安原 英明¹・木下 尚樹¹・Dae-Sung LEE²

¹愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

² College of Engineering, Dong-A University (840 Handan2-dong, Saha-gu Busan, 604-714, KOREA)

*E-mail: takumi.sugano.11@cee.ehime-u.ac.jp

近年、シェールオイル・ガスが新たな資源として注目を浴びている。その背景に水圧破碎技術の革新が挙げられる。この技術は、坑井内を満たした流体を加圧して、坑井付近の頁岩層に人工的な引張亀裂を発生させる技術である。また、亀裂の開放状態を維持するために、亀裂閉塞防止材であるプロパントを混入する。しかし、地下の高温高压環境では、プロパントの損傷や続成作用により透水性能の低下が予想される。即ち、効率的かつ持続的にシェールガス・オイルを回収するために、プロパントを圧入した岩盤亀裂の透水特性評価が必要不可欠となっている。そこで、本研究では、地下の高温高压環境を再現し、プロパント供試体及びプロパント処理した岩石き裂に対する透水試験を実施し、透水性変化を時系列で観察した。

Key Words : shale gas, hydraulic fracturing, proppant, permeability

1. 緒言

現在、世界のエネルギー源の81.6 %が化石燃料によって得られたものであり、石油、天然ガス、石炭の可採年数は、2008年の時点でそれぞれ42年、122年、60年と予測されている¹⁾。将来、これらの資源は枯渇する可能性が考えられる。そこで、従来の天然ガス資源と採掘方法が異なるシェールガスが新たな資源として注目を浴びている。シェールガスとは、頁岩層から採取される天然ガスのことである。可採埋蔵量は2010年の時点で、6,622 Tcfであり、天然ガスの可採年数を60年から120年まで倍増させるほどの量である²⁾。頁岩は泥岩の一種で難透水性であるため、開発は進んでいなかった³⁾。しかし、採掘技術の向上により、米国では2000年から2012年の間でシェールガス生産量は、約0.5 Tcfから約10 Tcfまで増加し、米国内の天然ガス生産量の約40 %を占めるまでに拡大している。2030年には約50 %以上を占めるまでに需要が拡大すると予測されており、世界のエネルギー事情に革命を起こしている⁴⁾。

世界各地でのシェールガス革命の背景には、水圧破碎技術の革新が挙げられる。水圧破碎技術とは坑井内を満たした流体を加圧して、坑井付近の頁岩層に人工的な引張亀裂を発生させる技術である⁵⁾。水圧破碎技術によって発生させた人工的な亀裂は、岩盤に作用する地圧によって時間が経過すると共に閉塞してしまう。従って、開放させた亀裂から効率的かつ持続的にシェールガスを回

収するために、開口状態を維持しなければならない。そこで、流体に亀裂閉塞防止材である砂粒（プロパント）を圧入・保持させることで、亀裂の開口状態を維持し、有効的な流量を確保している。しかし、高温高压環境である地下では、プロパントの破壊や続成作用により透水性能の低下が予測される。水圧破碎技術を用いて発生させる亀裂から回収するエネルギー量を長期予測するためには、プロパント処理した亀裂の長期的な透水特性変化の評価が必要不可欠である。

そこで、本研究では、温度、拘束圧を制御した環境で、プロパント供試体及びプロパント処理した亀裂に対する透水試験を実施し、時系列で透水特性評価を行う。さらに、透水性変化に起因するメカニズムについても検証する。

2. 実験概要

本研究は、高温高压環境下である地下深部を模擬的に再現することでプロパントの透水性変化を確認する。供試体はプロパントのみで構成される粒状供試体と、人工的に泥岩にき裂を作製し、そのき裂にプロパントを挿入した岩石き裂供試体の2種類を用いて透水試験を実施した(図-1)。粒状供試体においてはプロパントのみの透水性変化を評価し、岩石き裂供試体においては岩石の亀裂とプロパントとの相互作用に起因する透水性変化を評

価する。

透水試験は、等方圧を保持した環境で行い透過率の経時変化を観察した。その際に、水圧破碎を実施する周辺の岩盤に作用する応力を再現するため、拘束圧を10.0 MPaに設定した。さらに、室温条件である20℃と、水圧破碎を実施する周辺の岩盤に作用する温度を再現するため90℃の2つの温度に設定して実験を実施した。また、透水試験中に透過水を採取しICP発光分光分析を行い、供試体より溶出した物質の濃度経時変化を評価した。

3. 実験結果

(1) 透水試験結果

本研究では、温度を20℃および90℃条件に設定し透水試験を実施した。温度の影響による透過流体の密度と粘性係数の差異を考慮するために、透水係数ではなく透過率を用いて透水特性の評価を実施した。

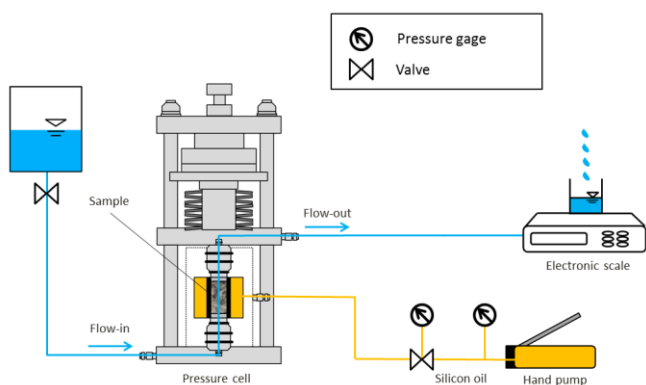


図-1 透水試験模式図

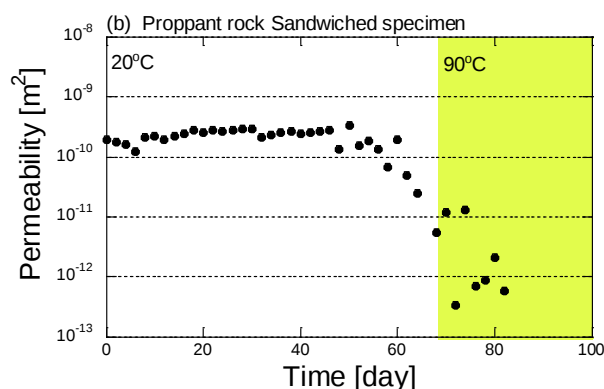
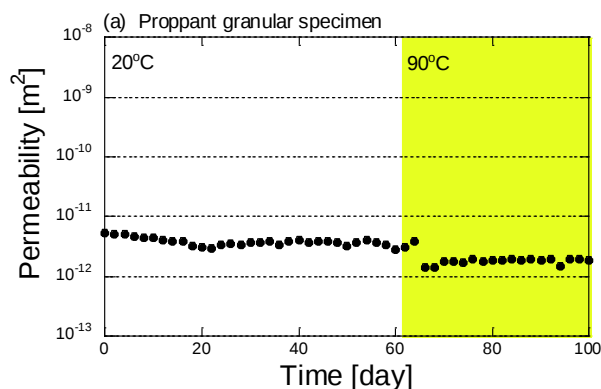


図-2 透水試験結果

(a) 粒状供試体 (b) 岩石き裂供試体

粒状供試体と岩石き裂供試体の2種類の供試体を用いて透水試験を実施したため、それぞれ、下記の方法で評価した。粒状体透水試験は、式(1)で示す。

$$K = \frac{\mu Q H}{A \Delta P} \quad (1)$$

ここで μ : 透過流体の粘性係数 [Pa s], Q : 流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], L : 供試体の高さ[m], A : 供試体断面積[m^2], ΔP : 透水差圧 [Pa]である。岩石挟持透水試験は、式(2)で水理学的亀裂開口幅 b を算出する。さらに、水理学的亀裂開口幅 b を以下の式に代入することで透過率 K を求める。

$$b = \left(\frac{12 \mu Q L}{W \Delta P} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここで b : 水理学的亀裂開口幅 [m], W : 供試体直径 [m]である。

$$K = \frac{b^2}{12} \quad (3)$$

透水試験結果を図-2に示す。粒状体透水試験では、62日目以降に温度を90℃に上昇させると透過率が減少した(図-2(a))。これは、加温によりプロパントの体積が膨張し、粒子の格子構造が密になったためであると考えられる。そして、20℃条件および90℃条件での透過率がほぼ定常値を示していることから、プロパントの性能は100日程度で変化しないと考えられる。岩石き裂供試体では、20℃条件および90℃条件で82日までに2オーダー以上の減少がみられた(図-2(b))。これは、プロパント粒子が泥岩き裂表面へ徐々に貫入したことによる、き裂開口幅の閉塞が要因であると考えられる。また、泥岩中の鉱物が溶解し、二次鉱物としてプロパント粒子表面に沈殿することによって、透過断面の間隙が減少し、透過率低下へつながったことも要因の一つとして挙げられる。

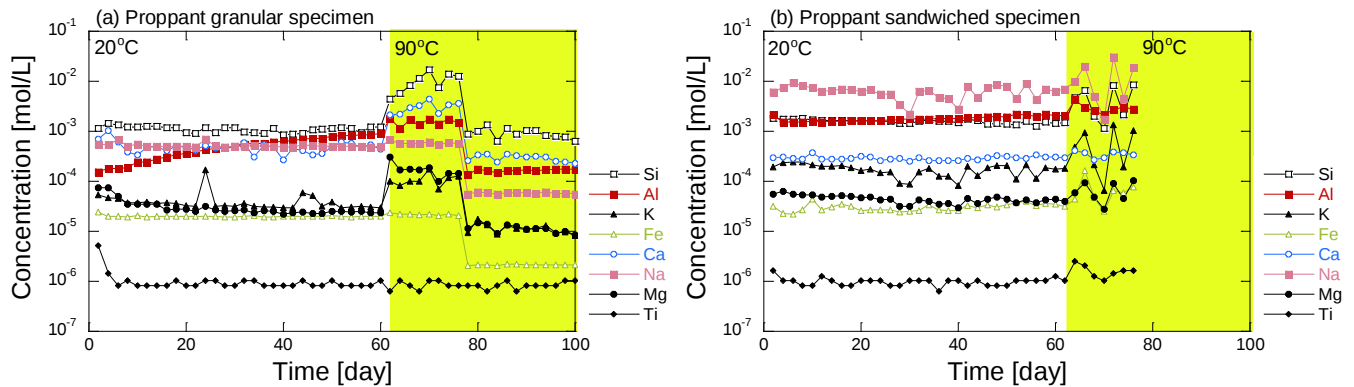


図-3 ICP 発光分光分析結果
(a) プロパント粒状供試体 (b) 岩石き裂供試体

(2) 物質濃度評価

本研究では、透水試験で採取した透過水に含まれる元素の溶出濃度を測定した（図-3）。粒状供試体の測定結果（図-3（a））から、90℃に移行した際に、透過水中の元素濃度が全体的に増加していることが確認できる。また、20℃条件、90℃条件ともにSi濃度が最も高い結果が得られた。これはプロパントに含まれるSi元素が粒子表面より溶出したためであると考えられる。

岩石き裂供試体（図-3（b））では、Si濃度よりもNa濃度が高い結果となった。しかし蛍光X線分析の結果よりプロパント自体にNaがほとんど含まれないことから、Naを含有する泥岩の鉱物溶解が起因していると考えられる。

(3) 鉱物分析結果

本研究では、初期状態と透水試験後のプロパントを粉末にし、X線回折分析を実施した。XRDを実施した結果を図-4に示す。透水試験前のプロパントからはムル石（Mul）、長石（Fsp）、赤鉄鉱（Hem）、鋭錐石（Ant）が確認された（図-4（a））。これは、プロパントに元来含まれている鉱物であり、矛盾のない結果となった。同様に、粒状供試体を用いて実施した透水試験100日後のプロパントについてもムル石（Mul）、長石（Fsp）、赤鉄鉱（Hem）、鋭錐石（Ant）が確認されたが、それ以外の二次鉱物の生成は確認できなかった（図-4（b））。岩石き裂供試体プロパントのX線回折分析結果を図-4（c）に示す。粒状供試体同様、岩石き裂供試体は実験前後でほとんど変化が見られなかった。つまり本研究で実施した透水試験結果では、XRDで検出される程度の二次鉱物の生成は確認できなかった。

(4) 微視構造観察結果

本研究では、等方圧保持透水試験が供試体に及ぼす影響を、透水試験前後のプロパントの粒子表面を観察することで評価する。

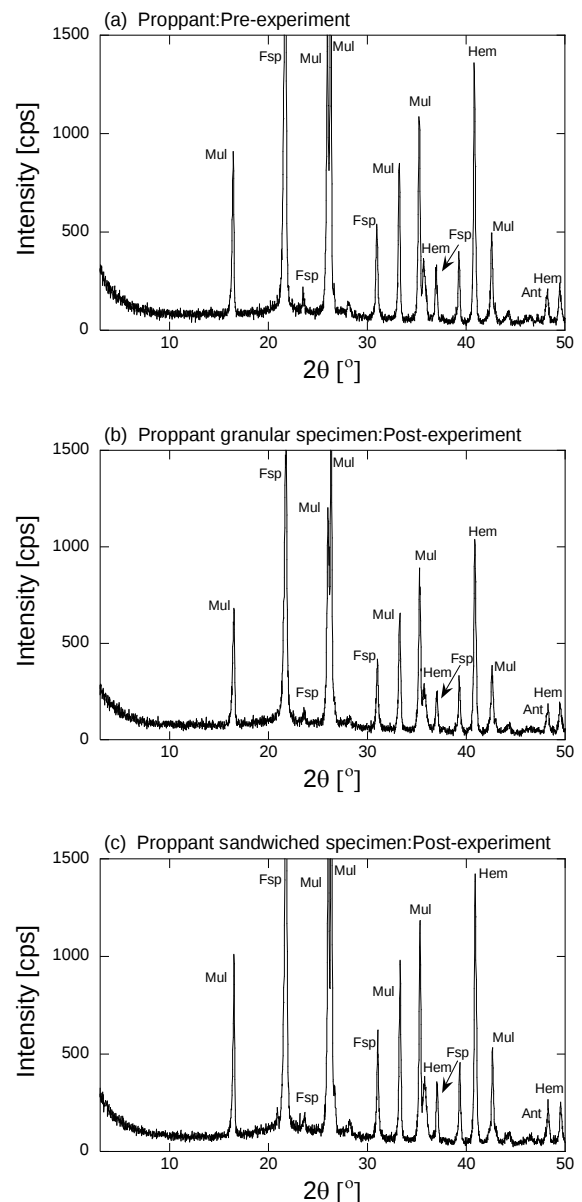


図-4 X線回折分析

- (a) プロパント
(b) 透水試験後粒状供試体プロパント
(c) 透水試験後岩石き裂供試体プロパント

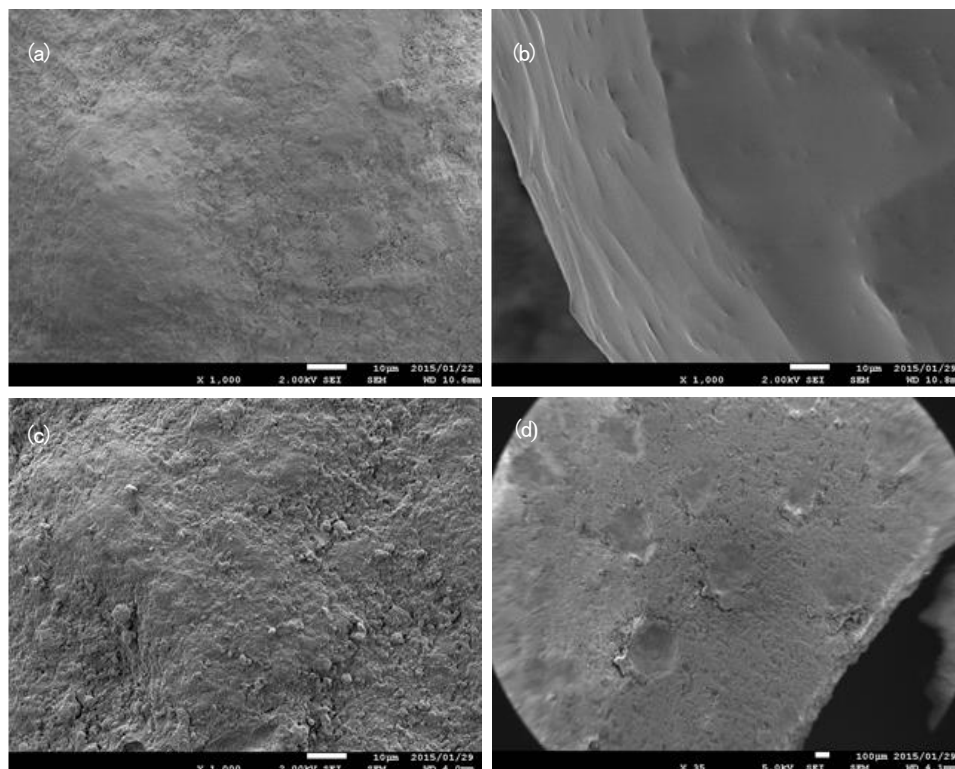


図-5 微視構造観察

(a) プロパント SEM 画像 (1000 倍)

(b) 透水試験後粒状供試体プロパント SEM 画像 (1000 倍)

(c) 透水試験後岩石き裂供試体プロパント SEM 画像 (1000 倍)

(d) 透水試験後岩石き裂供試体泥岩表面 SEM 画像 (35 倍)

透水試験前のプロパントを図-5 (a) に示す。透水前のプロパントは全体的に球形に近く、粗い表面を確認できるが、粒状体透水試験で用いた透水後のプロパント図-5 (b) は、実験前と比較して凹凸が減少し、表面が滑らかになっていることが確認できる。

図-5 (c) の岩石き裂供試体で用いたプロパントは、表面が図-5 (a) の実験前のプロパントよりも粗くなっており、溶解した泥岩中の鉱物が二次鉱物としてプロパント粒子表面に再沈殿していることが確認できる。このことから、二次鉱物の沈殿が、透過流路を妨げる要因となり、岩石き裂供試体透水試験結果図-2 (b) の48日目からの透過率低下に寄与したと考えられる。

また、岩石き裂供試体で用いた泥岩のき裂表面を微視構造観察した結果を図-5 (d) に示す。この結果から、プロパントの貫入痕と考えられる凹みが確認された。

4. 結言

本研究では、プロパントのみで構成される粒状供試体とプロパントを泥岩で挟んだ岩石き裂供試体を対象とし透水試験を実施し、透水性の経時変化を観察した。本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 透水試験では透水性を時系列で観察した。粒状供試体透水試験では、20 °C条件で透過率の変化は確認できなかった。しかし、温度を90 °Cに上昇させると透過率が低下した。これは、温度上昇によってプロパントの体積が増加し、粒子の格子構造が密になり流路の間隙が減少したためであると考えられる。そして、20 °C条件および90 °C条件で透過率がほぼ定常値を示していることから、プロパントの性能は100日程度で変化しないことが判明した。また、岩石き裂供試体透水試験では、20 °C条件および90 °C条件での透過率の低下が確認された。これは、プロパント粒子が泥岩き裂表面へ徐々に貫入したことによるき裂開口幅の閉塞が要因であると考えられる。

2) 透水試験中に採取した透過水を用いて、ICP発光分光分析を実施し供試体から溶出する物質濃度を時間変化で評価した。粒状供試体では、20 °C条件、90 °C条件双方ともSi濃度が最も高い結果となった。これはプロパントに含有しているSi元素がプロパント粒子表面から溶出したことに起因している。岩石き裂供試体では、Si濃度よりもNa濃度が高い結果となった。これはNaを含有する泥岩の鉱物が溶解したことが要因であると考えられ、微視構造観察で見られた二次鉱物の成

分元素であると推察される。

付録

3) 鉱物分析では、実験前のプロパントと粒状供試体、岩石き裂供試体で用いたプロパントを対象にX線回析分析を実施した。その結果、双方の供試体のプロパントから二次鉱物の生成は確認されなかった。

4) 微視構造観察では、透水試験で用いたプロパントおよび泥岩を観察した。粒状供試体透水試験後のプロパントは、表面が滑らであることを確認できたこれは、粒子表面が溶解したと考えられ、物質濃度分析結果からプロパントの粒子表面のSiが溶出したためであると考えられる。また、岩石き裂供試体に用いたプロパントの表面には、泥岩き裂表面から溶解した鉱物が二次鉱物として粒子表面に再沈殿していた。このことから、二次鉱物の沈殿が透過流路を妨げる原因となり透過率低下に寄与したと考えられる。

今後は、より高温・高圧・長期間の等方圧保持透水試験を実施することで、プロパントの劣化状況および透過率の経時変化について確認する必要がある。また、岩石き裂供試体透水試験に用いたプロパントを微視構造観察した際にみられた二次鉱物の沈殿の、透過率低下への寄与度を定量的に示すことが課題である。

「Tcf」とは、容積の単位で、1兆立方フィートのことである。 $1\text{Tcf} \approx 28.3 \times 10^9 \text{m}^3$ である。天然ガス量を表現するのに使われている。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、日本のエネルギー2010, pp.13-14, 2011.
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁：化石燃料調達をめぐる環境変化について、総合エネルギー調査会総合部会第二回会合資料2, pp.8, 2013.
- 3) 羽場広樹：カナダのシェールガス事業について、Journal of the Japanese Association Petroleum Technology, Vol.77, No.2, pp.137-143, 2012.
- 4) みずほ産業調査部：米国の競争力の源泉を探る, Vol.45, No.2, pp.26-27, 2014
- 5) 伊原賢：水圧破碎技術の歴史とインパクト, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料2011, Vol.45 No.3, pp.17-20, 2011.

EVALUATION OF PERMEABILITY CHANGE IN PROPPANTS AND PROPPANT TREATED ROCK FRACTURE

Takumi SUGANO, Hideaki YASUHARA, Naoki KINOSHITA and Dae-sung LEE

In order to efficiently and sustainably extract shale gas from deep subsurface, the permeability of the proppant-treated fractures are examined in detail. In this work, we have observed the evolution of permeability in the proppants and the proppant-treated fractures under the simulated stress and temperature conditions. In addition, the mechanisms of the permeability change were investigated. The experimental results show that the permeability in the proppants little changes for about 100 days, while it decreases with time significantly in case of the proppant-treated fractures. The reduction may be the interpenetration of the proppants and the mineral re-precipitation.