論文 き裂開口変位計測によるシャットインプレッシャーの評価*

竹 原 孝¹ 山 口 勉² 水 田 義 明³
成 田 孝⁴ 石 原 治 幸⁵

Evaluation of Shut-in Pressure by Fracture Opening Displacement Measurement
by Takashi TAKEHARA¹, Tsutomu YAMAGUCHI¹, Yoshiaki MIZUTA², Takashi NARITA¹
and Haruyuki ISHIHARA¹

1. National Institute for Resources and Environment, Onogawa, Tsukuba 305-8569
2. Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755-8611

In this paper, a newly developed double packer was introduced. In hydraulic fracturing operation, an opening and closing behavior of a fracture was related to in-situ stress state. A purpose of the new packer was to measure the fracture opening directly. The new packer consisted of two co-axial pipes that move independently. As sealing elements were fixed to each of two pipes, fracture opening could be measure by relative displacements of two co-axial pipes. Two types of sealing elements were examined. One was a rubber and the other was lead. The former was named rubber-seal packer, and the latter is named metal-seal packer.

A conventional double packer, the rubber-seal packer and the metal-seal packer were used in the Kamioka mine in 1998. In this mine, a hydraulic fracturing experiment in order to estimate in-situ stress was done using a borehole that was drilled horizontally from a gallery in 1996. The newly developed packers were used to re-open the pre-existed artificial fracture.

The result of the metal-seal packer experiments showed that relative displacements of two co-axial pipes had a good correlation with the wall expansion that was measured at vicinity of the borehole. It became clear that the metal-seal packer was possible to measure the fracture aperture directly. The shut-in pressure, that is thought to be equivalent to a magnitude of normal stress component, was estimated from the relative displacements of two co-axial pipes. This shut-in pressure estimated from the metal-seal packer agreed well with those from the Muskat method and Hayashi & Haimson method.

KEY WORDS : Hydraulic Fracturing, Fracture Aperture, Shut-in Pressure, Double Packer, Rubber-Seal Packer, Metal-Seal Packer

1. 結 言

原位置応力測定法の一つである水圧破碎法において、き裂造成時のき裂の進展方向、注水流量、注水圧力などは、地圧の評価および岩盤の安定性などの岩盤挙動の解析・評価を行う際に、初期応力の推定のために必要な値として計測されている。この水圧破碎で造成されたき裂に直交する方向の地圧の大きさを推定する方法として、シャットインプレッシャーから求める方法がよく知られており、その解析法として Muskat 法 (Muskat, 1937) や Hayashi

& Haimson 法 (Hayashi *et al.*, 1991) などが提案されている。これらの方法では、シャットインプレッシャーは水圧破碎実験時のシャットインにより得られる圧力減衰曲線、すなわち、シャットインカーブを解析することにより求められる。

原位置実験で、水圧破碎時やき裂再開口時でのシャットイン状態における開口き裂の挙動を直接に計測できるならば、圧力データのみでは評価が難しいシャットインプレッシャーの詳細な検討ができると考えられる。しかし、一般にこれまでの水圧破碎実験は注水圧力とき裂の進展方向より岩盤内応力の方向や大きさを調べるために実施されており、造成されたき裂の挙動およびき裂の開口幅を直接に計測した事例は少ない。筆者らは、水圧破碎によって造成されるき裂の開口挙動に着目し、横き裂を対象としてき裂開口変位を直接的に計測することを目的としたき裂開口変位計測型パッカー（以下では変位計測型パッカーと呼ぶ）を開発した。

本報告では、神岡鉱山で行った水圧破碎き裂再開口実験において、変位計測型パッカーを用いたき裂開口変位計測実験結果とシャットインプレッシャーの評価について述べる。

* 2000 年 2 月 7 日受付 6 月 6 日受理 資源・素材学会平成 11 年度春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所地殻工学部岩盤工学研究室
 2. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所地殻工学部 地殻エネルギー研究室 室長
 3. 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科
 4. 正会員 資源環境技術総合研究所地殻工学部岩盤工学研究室 主任研究官
 5. 正会員 資源環境技術総合研究所地殻工学部岩盤工学研究室
- 【著者連絡先】 FAX 0298-61-8708 (資源研・地殻工学部)

E-mail : takehara@nre.go.jp

キーワード：水圧破碎，き裂開口変位，シャットインプレッシャー，ダブルパッカー，ラバーシールパッカー，メタルシールパッカー

2. 実験概要

2・1 実験現場

実験は、岐阜県神岡町にある神岡鉱業(株) 茂住坑内で行われた。実験場所は跡津坑口から 1,350 m、被り約 750 m の坑道内に設けられている。実験現場付近の見取り図を Fig.1 に示す。実験現場付近の岩質は石英片麻岩である。

この実験場では、1996 年に水圧破碎実験および水圧破碎によって造成されたき裂への注水実験 (Mizuta *et al.*, 1996) が行われた。Mizuta らの実験を要約すると以下のようである。Fig.1 に示すように、坑道壁面に深さ 6 m、孔径 76 mm の水平ボアホールが削孔された。Table 1 に当時のボーリングコアにより得られた物性値を示す。1996 年のこの実験では、水圧破碎によってボアホールに対して垂直にき裂の方向を誘導するために、岩盤壁面から約 1.7 m の地点でアプレシブウォータージェットを用いてボアホール軸に垂直な円盤状のスロットを切削している (Mizuta *et al.*, 1997)。その後、ラバーシールパッカー (詳細は後述) を用い、スロットを含む区間を密閉して水圧破碎および注水実験によりき裂を進展させた。これらの実験後に、き裂進展状況を把握するため、新たに深さ 3 m、孔径 76 mm の水平観測孔をき裂を貫通するように削孔した。観測孔では、き裂位置の壁面からの距離の確認とその後の注水実験におけるき裂内部での水圧計測を行っている。当時の水圧破碎および注水実験では、差動式変位変換器 (24 本) を用いて坑道壁面の岩盤表面変位が計測された。ボアホール周辺岩盤に高さ 3 m、幅 4 m の範囲で岩盤表面変位計測が行われ、計測範囲以上の広がりを持つき裂が造成されたことが確認されている。Mizuta ら (1996) は、注水実験のシミュレーションを準 3 次元非定常流れの有限要素法解析と 3 次元境界要素法解析を用いて実施し、原位置計測から得られた結果と解析結果について述べている。山下 (1997) は Gandi-Lomize モデルを用いた 1 次元定常流れと 2 次元有限要素法とを組み合わせた解析により、水圧破碎孔に対して直交するき裂内部の流体圧やき裂の厚みの分布の推定を行っている。以上のように、この実験場ではき裂の進展方向などが既に明らかになっているため、この造成き裂を利用してき裂への注水によるき裂再開口実験を行うこととした。

2・2 実験手順

1998 年に行われた本報で述べる実験は、1996 年の実験から、ほ

Table 1 Mechanical properties of core samples.

Property	Value
Uni-axial Compressive Strength	79.0MPa
Tensile Strength (Discs)	4.7MPa
Young's Modulus	48.4GPa
Poisson's Ratio	0.15

Fig.1 Plane view of the experimental site.

Fig.2 Location of LVDTs to measure the displacement of the wall.

Fig.3 Schematic diagram of experimental system.

ぼ 2 年が経過した後の人工き裂再開口実験となる。本実験での計測項目は、き裂への注水流量、注水圧力、水圧破碎ボアホール周辺の岩盤表面変位である。岩盤表面変位の計測には $0.5 \mu\text{m}$ の分解能を持つ空気圧駆動型の差動式変位変換器 (LVDT、センサ保持圧は約 0.6 MPa) を用いた。LVDT の設置には、床面に鋼鉄製のフレームを組み、フレームに取り付けたステンレス管にボアホールに平行になるように計 11 本の LVDT を固定した。これらの LVDT を岩盤壁面にボルトで固定したアルミニウム板に押し当てて、岩盤の変位量を計測した。Fig.2 に岩盤壁面の LVDT の配置図を示す。また、Fig.3 に本実験の注水システム、岩盤表面変位およびき裂開口幅計測システムの概略図を示す。注水圧力はパッカーに内蔵された圧力変換器で計測した。計測した電圧はシグナルコンディショナー ((株) 共和電業製 DPM-611B) によって電圧に変換・増幅し、データロガー ((株) 共和電業製 DAA-110A) によって収録した。LVDT による岩盤表面変位およびき裂開口幅計測はアンプおよびフィルタを介して同一のデータロガーによって収録した。注水・加圧に使用したポンプは、2 連式プランジャーポンプ (昭和機器工業 (株) 製) であり、最大吐出量は 3 l/min である。Fig.4 に実験場付近の様子を示す。人工き裂再開口実験では、通常のダブルパッカー (ストラドルパッカー) と新しく開発した変位計測型パッカーを用いた。これらのパッカーの概念図を Fig.5 に示す。Fig.5(a) はダブルパッカーであり、通常の水圧破碎で孔井の一部を閉塞するために用いられる。ダブルパッカーでは、ボアホール内部の注水区間を密閉するためにシーリングエレメント内部に流体を注入し、流体圧により風船を膨らませるように膨張させる

Fig.4 View of the experimental site.

Fig.5 Conceptual diagram of packers.

構造となっている。これらの一組のシーリングエレメントは、いずれも1本のパイプに固定されている。Fig.5(b)は新しく開発した変位計測型パッカーである。このパッカーはボアホール内にセットされた状態では、孔口側シーリングエレメントと孔奥側シーリングエレメントは同一のパイプに固定されておらず、2つのシーリングエレメントが独立して可動する構造であり、一組のシーリングエレメントの相対変位（以下、簡単のためパッカー変位と呼ぶ）を孔口まで延長した2重管の相対変位量から計測することができるため、き裂開口幅を直接的に計測することが可能である。すなわち、一組のシーリングエレメントで密閉された区間に注水を行い、き裂が開くれば一組のシーリングエレメントはき裂の開口を拘束することなくき裂開口幅と等しく相対的に変位することになる。また、今回開発したパッカーでは、シーリングエレメントを膨張させる構造は通常のダブルパッカーとは異なり、各シーリングエレメントに内蔵したピストンを流体圧で駆動し、シーリングエレメントをボアホール軸方向に圧縮して膨張させることによりボアホール孔壁に密着させる構造となっている。変位計測型パッカーでは、シーリングエレメントとしてゴムを用いたもの（硬質ゴム二対で一組、以下ラバーシールパッカーと呼ぶ）と、金属を用いたもの（鉛三対で一組、以下メタルシールパッカーと呼ぶ）の2種類を製作した。これらのパッカー区間の相対変位は2重管である計測用ロッドを介して、ラバーシールパッカーで

Fig.6 Three kinds of packers used in experiments in 1998.

Fig.7 History of pressure and flow rate.

は最大計測範囲10 mmのLVDT一対で計測し、メタルシールパッカーでは最大計測範囲10 mmと5 mmのLVDT一対で計測を行った。Fig.6に今回使用した3種類のパッカーを示す。また、Table 2にそれぞれのパッカーを用いた実験内容の一覧表を示す。

3. 実験結果

き裂再開口実験前に1996年の水圧破碎位置を特定するため、ボアホール内部の型取りをインプレッションパッカー（型取り部の全長約1 m）によって行った。その結果、孔口から1.62 mの地点に幅5 mmから10 mmのスロット造成跡が確認でき、き裂造成位置を特定した。

初めに、ダブルパッカーを水圧破碎が行われたボアホール内のき裂造成位置に設置して、人工き裂再開口実験を行った（Table 2に示したA-1からA-5の実験）。ダブルパッカーではき裂開口幅は計測できない。Fig.7に注水時の注水圧力および流量と経過時間の関係を示した。注水と同時に圧力は急上昇し、ピークを経た後はほぼ一定となり、その後孔井のシャットイン（注水を停止すると同時に注水ラインのバルブを閉じる操作）を行った。このシャットイン後、圧力が漸減する様子が分かる。これは、き裂内に蓄えられていた水が岩盤中に浸透していくため等により生じる現象で、この圧力減衰曲線をシャットインカーブと呼ぶ。このダブルパッカーを用いた実験では、観測孔および水圧破碎ボアホールより左側3.5 m付近の岩盤表面からの出水が確認できたため、1996年に造成したき裂を再開口したことが確認できた。このダブルパッカーによる注水は計5回行われ、いずれもシャットインを実施した。Table 2のA-4、A-5の実験では注水量を段階的に変化させた実験を行った。A-5の実験では、ボアホールから2 mおよび3 m地点の岩盤表面変位が急激に増加し、3.5 m地点での出水点より湧出量が増加したことが確認できた。

次に、ラバーシールパッカーを用いた人工き裂再開口および

Table 2 Summary of experiments.

Test No.	Date	Sampling Interval	Injection Flow Rate (Before Shut-in)	Pressure (Before Shut-in)	Type of Packer	
A-1	1998/2/19	16:36:31	0.05 sec	245 cc/min	7.42 MPa	Double Packer
A-2	2/20	11:26:27	0.05	525	8.92	Double Packer
A-3		14:16:36	0.10	581	8.89	Double Packer
A-4		15:10:43	0.10	250 ~1500	6.56	Double Packer
A-5		16:36:47	0.10	250 ~1500	9.11	Double Packer
B-1	2/21	13:22:14	0.10	90	7.14	Rubber-Seal Packer
B-2		14:26:42	0.10	174	8.19	Rubber-Seal Packer
B-3		16:12:27	0.10	154	6.54	Rubber-Seal Packer
B-4		17:15:06	0.10	500 ~1500	9.11	Rubber-Seal Packer
C-1	2/23	13:30:00	0.20	72	5.19	Metal-Seal Packer
C-2		14:36:30	0.10	148	6.86	Metal-Seal Packer
C-3		15:21:25	0.10	362	7.60	Metal-Seal Packer
C-4	2/24	9:04:16	0.10	734	7.81	Metal-Seal Packer
C-5		10:05:30	0.10	1257	8.10	Metal-Seal Packer
C-6		10:53:10	0.10	1611	8.21	Metal-Seal Packer

シャットインの実験を計 4 回実施した (Table 2 に示した B-1 から B-4 の実験)。このとき、観測孔からの出水によるき裂内の圧力減衰を防ぐため、ダブルパッカーで観測孔を止水し、同時にこの観測孔を介してき裂内部の圧力計測を行った。Fig.8 に B-2 の実験時に計測された注水圧力および流量と経過時間の関係を、また、Fig.9 にこの実験における注水圧力およびパッカー変位の様子を示した。ラバーシールパッカーでは、シーリングエレメントに硬質ゴムを使用しているため、注水圧力の急増に対する硬質ゴムの変形の影響が大きく現れており、注水圧力がほぼ一定になると計測されるパッカー変位は注水圧力に応じてある一定値を示している。シャットイン後、圧力の減少に伴いパッカー変位も漸減している様子が分かる。最後にき裂の開口残留変位量および硬質ゴムの塑性によると思われる変形量が残留変位として計測されている。この B-2 の実験では、シャットイン直前におけるパッカー変位量は 8.0 mm まで達しているが、ボアホール直近での岩盤表面変位は $20\ \mu\text{m}$ であった。山下ら (1997) の考察によればボアホール直近での岩盤表面変位とき裂開口変位の大きさはオーダーとしてはほぼ等しくなる。したがって、岩盤表面変位量から推定すると実際のき裂開口変位は数 $10\ \mu\text{m}$ であろう。それにもかかわらずパッカー変位量は数 $10\ \mu\text{m}$ と比較して極めて大きな値となっている。これはシーリングエレメントであるゴムの変位量が大きいためである。このことから、ラバーシールパッカーによるき裂の詳細な開口変位量の計測は実用上困難であることが明らかとなった。

最後に、メタルシールパッカーを使用した人工き裂再開口およびシャットインの実験を計 6 回行った (Table 2 に示した C-1 から C-6 の実験)。Fig.10 に LVDT 設置の様子を示す。Fig.11 に C-6 の実験時に計測された注水圧力および流量と経過時間の関係を、また、Fig.12 にこの実験で計測された注水圧力とパッカー変位を示した。パッカー変位は注水圧力の上昇とともに急増し、注水圧力がほぼ一定になった後も増加している。シャットイン直後は、圧力とパッカー変位は急減するが、その後圧力は漸減傾向を示し、

Fig.10 Setting view of LVDTs during fracture re-opening experiment using metal-seal packer.

パッカー変位は一定値となっていることが分かる。この傾向は、6 回の実験すべてで計測された。

4. 考 察

3 種類のパッカーを用いた実験を行ったが、それぞれのパッカーにおいて注水を開始すると同時に岩盤表面変位が増加することから、き裂を再開口していることが確認できた。2 連プランジャーポンプの特性から、各実験において注水流量は脈動を伴っていたが、パッカー内部に設置された圧力変換器による値は、注水流量が脈動してもほぼ安定した値を示していた。注水流量は約 $100 \sim 1,600\ \text{cc/min}$ の範囲であったが、シャットイン直前の注水圧力は $200\ \text{cc/min}$ を超えると Table 2 に示したように $7 \sim 9\ \text{MPa}$ ほどの値で人工き裂を再開口していることが分かる。

メタルシールパッカーによるき裂開口変位計測実験の結果を示した Fig.12 を見ると、注水圧力が一定になってもパッカー変位が増加している。この変位の増加は、き裂の開口変位の増加とシーリングエレメントである鉛部分の塑性変形による変位の増加とを合計して計測した結果である。シャットイン後、パッカー変位は漸減した後一定値を示しているが、これはシーリングエレメントである鉛の塑性変形分がそのまま残留し、き裂開口変位分のみが

Fig.8 History of pressure and flow rate.

Fig.11 History of pressure and flow rate.

Fig.9 History of pressure and displacements.

Fig.12 History of pressure and displacements.

周辺地圧の影響で閉じていったためであると考えられる。このように考えると、シャットイン直後におけるパッカー変位の最大値と、圧力が漸減してこのパッカー変位が一定となった値との差 (Fig.12 中、 Δd で示した) が、シャットイン前後のき裂の開口変位量と等しいといえよう。メタルシールパッカー使用時の各実験におけるシャットイン直前の注水圧力と、シャットイン後に計測されたメタルシールパッカー変位量 (Δd) およびボアホール直近の岩盤表面相対変位量 (Fig.12 中、 Δd_W で示した) との関係を図 13 に示す。各実験において注水圧力の増加とともに双方の相対変位量が増加している。メタルシールパッカーの変位量 (Δd) がき裂の開口変位量と等しいならば、き裂の開口変位量と岩盤表面変位量 (Δd_W) の間には良好な相関関係があるといえる。したがって、メタルシールパッカーによるき裂開口変位の計測は、横き裂の開口変位挙動を捉える手法として有効であると考えられる。

水圧破砕法では、シャットインプレッシャーからき裂に直交する応力を求める方法がよく知られている (Lee *et al.*, 1989)。そこで、よく用いられる Muskat 法と Hayashi & Haimson 法によってシャットインプレッシャーを求め、メタルシールパッカーで計測されたき裂開口変位挙動との関係を検討することとする。

Muskat 法はシャットイン後のシャットインカーブを用いてシャットインプレッシャーを指数関数によって外挿する方法であり、

$$P = \exp(at + b) + P_a$$

で示される。ここで、 P は圧力、 t は時間、 a (< 0) と b は未知定数、 P_a はシャットインカーブが漸近する圧力である。Muskat 法によって求めたシャットインプレッシャー例を図 14 に示す。シャットインプレッシャー P_s は、Fig.14 中で示したシャットインカーブのおおよそ 1,400 sec 以降の直線な部分に対して、上式によって最も相関のよい指数関数を求め、これをシャットイン開始時刻まで外挿して求める。図で示した C-6 の実験では、 $P_a = 0.09$ MPa としたときに最も相関のよい指数関数が求まり、シャットイン開始時刻における外挿値は $P - P_a = 0.97$ MPa であった。このときの圧力 P がシャットインプレッシャーとなる。

Hayashi & Haimson 法では、き裂進展が終了した段階からき裂先端が閉塞し始めるまでを Stage I、き裂先端が閉塞した段階からき裂が完全に閉塞するまでを Stage II、き裂が完全に閉塞した後を Stage III と定義している。Fig.15 に概念図を示す。ここで、き裂先端の閉塞開始時点の水圧がき裂に直交する応力と等しいとすると Stage I から Stage II へと遷移する際の水圧がシャットインプレッシャーとなる。本研究で行った実験はき裂再開実験であり、造成き裂はボアホール周辺のみではなく広範囲に広がっていると考えられる。しかし、再開き裂に対してもき裂先端の閉塞は Hayashi & Haimson 法の概念で示されるき裂先端の閉塞と同様で

Fig.13 Displacements versus pressure in metal-seal packer experiment.

Fig.14 Shut-in pressure estimated by the Muskat method.

であると仮定し、Hayashi & Haimson 法によるシャットインプレッシャーとき裂開口変位挙動を検討することとした。以上のことから結果を例示すると Fig.16 となる。縦軸に圧力の減衰率の逆数、 $-dT/dP$ (T は時間、 P は流体の圧力) を取り、横軸に圧力 P をとると、Stage I と Stage III はそれぞれある切片と傾きを持った線形関係が成り立つ。また、これらの直線に挟まれた部分が Stage II となり、シャットインプレッシャーは Stage I に当てはめた直線が Stage II へと遷移する交点での圧力となる。C-6 の実験でのメタルシールパッカーによるき裂開口変位計測結果と、Muskat 法および Hayashi & Haimson 法によるシャットインプレッシャーの推定値をまとめて Fig.17 に例示した。メタルシールパッカーによる変位計測に注目すると、き裂の閉塞速度が緩やかになり開口変位が一定値になる付近の圧力が、Muskat 法および Hayashi & Haimson 法で求めたシャットインプレッシャーに対応している。シャットインプレッシャーは、Muskat 法による値が Hayashi & Haimson 法

Fig.16 Shut-in pressure estimated by the Hayashi & Haimson method.

Fig.15 Conceptual diagram of the Hayashi & Haimson method. (after Hayashi *et al.*, 1991)

Fig.17 Relation between shut-in pressure and displacements of metal-seal packer.

による値より小さく見積もられており、Muskat 法では、き裂が閉塞して開口変位がほぼ一定値になる直前付近の圧力を示している。Hayashi & Haimson 法による Stage I から Stage II の遷移点は、き裂先端が閉塞した場合に対応するものと解釈される。また、Stage III 以降は開口変位が一定値となっており、き裂が完全に閉塞したものと解釈できる。各実験において、メタルシールパッカーにおけるシャットイン中のき裂の挙動は、Fig.17 に例示したき裂の閉塞過程とほぼ同様であり、開口変位が一定値となる前の屈曲点付近における圧力が、2つの手法で推定したシャットインプレッシャーであると推測される。今回の、すべての実験におけるシャットインプレッシャーを Muskat 法で整理すると、平均で 1.28 MPa (標準偏差 0.34 MPa) の値が得られた。

シャットインプレッシャーの評価法には上述の Muskat 法や Hayashi & Haimson 法以外にも種々の方法 (例えば新ら, 1996) がある。これらの方法はいずれもシャットインの際に計測された圧力の経時変化あるいは圧力と流量の関係を解析の対象としており、本報で述べたようにき裂の閉塞過程を実測すれば、より正確

な解析が行えると考えられる。本手法における問題点としては、横き裂を対象としたき裂開口幅の計測しかできないこと、ボアホール深部において用いる場合には孔口まで二重管を設置することが非現実的であること、また、縦き裂には応用できないことなどが挙げられる。

5. 結 言

本報では直接的な計測が困難であるき裂開口幅を計測する方法として、横き裂を対象とした変位計測型パッカーとしてラバーシールパッカーとメタルシールパッカーとを製作し、これらを用いて既存の人工き裂の再開口実験を行った。その結果、メタルシールパッカーを用いるとき裂開口量とき裂閉塞挙動の直接的な計測が可能であることを明らかにした。また、シャットインプレッシャーに関して、解析的に求める Muskat 法および Hayashi & Haimson 法による推定値と実測されたき裂の閉塞挙動の関係を検討した。その結果、き裂の閉合をき裂開口変位計測によって確認する方法は、これまでの方法で推定されたシャットインプレッシャーと密接な関連があることが明らかになった。

謝辞 本研究は、当所における経常研究 R-KO959807 と文部省科学研究費基盤研究 (B)(2)、研究課題番号 09555321 により行われた。ここに付記し、謝意を表する。

引 用 文 献

- Hayashi, K. and Haimson, B.C. (1991): Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. B11, p. 18311-18321
- Lee, M.Y. and Haimson, B.C. (1989): Int. J. Rock Mech. Min. & Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 6, p. 447-456
- Mizuta, Y., Ohnishi, Y., Okazaki, K., Yamashita, M., Narita, T., Tenma, N. and Yamaguchi, T. (1996): Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, p. 383-388
- Mizuta, Y., Ishida, T., Ohnishi, Y., Kuriyagawa, M., Yamaguchi, T., Narita, T. and Tenma, N. (1997): ISRM News Journal, Vol. 5, No. 1, p. 7-12
- Muskat, M. (1937): AIME Petrol., Vol. 123, p. 44-48
- 新 孝一・李方全・大久保誠介 (1996): 資源と素材, Vol. 112, p. 921-928
- 山下 貢・山口 勉・厨川道雄・成田 孝・水田義明 (1997): 資源と素材, Vol. 113, p. 15-21