3軸圧縮下における油層岩石の圧縮ガス浸透率測定法 とその結果について

山崎 豊彦*・吉田 潔**・玉置 修*

(昭和48年4月2日受理)

About the Compressed Gas Permeabilities of Reservoir Rocks under Triaxial Compressions

By

Toyohiko YAMAZAKI, Kiyoshi YOSHIDA & Osamu TAMAKI

Abstracts As recently, deep oil and gas reservoirs have been exploited, so it has been created the need for more basic data about the effect of overburden pressure on physical properties of reservoir rocks in drilling and production problems.

In this study, it has been discussed how varies were occurred on the permeabilities of rocks under triaxial compressions.

The samples used were less-permeable rocks (1.2 md and 1.4 md), more permeable one (240 md) and much permeable artificial sand-stone (660 md) in this experiment.

In the results, it has been certain that the permeability essentially depends on the differential pressure between the confining pressure and internal fluid pressure on less-permeable one.

On the contrary, the effect of the differential pressure were not almost recognized but the slippage effects slightly appeared on every permeable rocks at each fluid pressure.

On the directions of loads, the radial stress more affected than axial one on the permeability.

1. 緒 言

近年石油開発はその条件が酷しさを加え、陸上では深部油層の開発、海上では沿岸から沖合へ、かつ水深の深い方と移行し、このために払われる技術や資金も莫大なものである。とくに米国では、大深度油層の開発が進み20,000ftを越える井戸も出現してきた¹⁾。わが国では新潟地方で七谷層の開発が進み、3,000~4,000m級の坑井が仕上げられるようになり、深度の影響を無視しえなくなってきた。とくにある深度では異常高圧地帯が発生し掘さく技術でもこの対策が検討され、克服されていると聞いている。米国では8,000ftを越えた付近より、孔隙内の圧力が異常に高くなると指摘されている²⁾。このような条件の下における油層岩は被覆地層の圧力を受け、

油層流体圧と平衡を保っているものと考えられる。しかもその圧力は各方向で異なっていると考え、3軸圧縮下におかれた油層岩で代表することができよう。

一般に油層岩石のコア分析などは、大気圧下における試験が標準化しているが、最近高圧下における各種試験が行なわれるようになった。とくに高圧下における孔隙容積の変化に関して、枚挙にいとまないほどである。そのうちの代表的なものは W. van der Knap³⁾、および I. Fatt⁴⁾ の研究である。高圧下における浸透率の変化については、G.L. Chierici, G.M. Ciucci, F. Eva と G. Long⁵⁾ による ENI 研究グループの研究があり、I. Fatt, D.H. Davis⁶⁾ の被覆地層圧の影響に関する報告がある。また3軸圧縮下における岩石の浸透性変化については、W.H. Somerton, B. Wilhelmi⁷⁾ の研究がある。この研究では透過ガス体の圧力は常圧程度である。これらの研究結果はすべてまだ緒についた感があり、今

*早大理工学部

**山光石油開発株式会社

Fig. 1 浸透率測定装置

後幾多の応用研究をも含め、高压・高温下におかれた油層岩石の特性を把握するための研究が行なわれなければならないと考え、まず、正確かつ迅速に、浸透率測定が行ないうる装置の開発を行ない、これにより3軸圧縮下における多孔質岩石の高压ガス浸透率の測定を行なった。なお、この実験で用いた装置の原理は、C.L. Chrici の報告にもとづいたものである。

2. 実験装置

この装置は地下の高压状態を再現して、岩石の浸透率を測定するためのものである。大きく分けて、試料岩石に封圧・軸圧をかけて浸透率を測定するための試料ホルダー、封圧・軸圧負荷装置、高压ガス供給部、圧力調整および測定器類、流量測定器からなる。全体の系統図は Fig. 1 に示す。

2.1 試料ホルダー

Fig. 2 試料ホルダー

試料ホルダーは Fig. 2 に示すように、いくつかのステンレス製部品から成り、内部には試料に圧力をかけるための、内径17mm、外径26mmのネオプレンゴムスリ

ーブが入っている。ステンレス部品の各接続部は、Oリングによって圧力の漏洩を防ぐようになっている。この中で使用するコアは内径20mmで、長さ約50mm程度のものが使用される。

2.2 封圧・軸圧負荷装置

これは試料に3軸圧縮をかけるためのもので、ピストン形油圧ポンプを使用し、水を媒液として、圧縮流体を試料ホルダーに送る。ポンプと試料ホルダーの間は、外径3mm、内径2mmのステンレスパイプを通して接続する。封圧・軸圧は同一ポンプを使用して発生させるが異なる径路よりバルブ操作で、封圧・軸圧各部の圧力を調整することができる。その最大耐圧力は500kg/cm²である。

2.3 高压ガス供給部

ガスはガスポンプ、またはコンプレッサーよりガス溜めを通して供給する。ガスの種類は、空気、メタン、アルゴンガスの3種類であった。ガスポンプの直後には活性炭脱湿装置を設け、水分を除去した。脱湿装置を出た高压ガスは、希望の上流圧力に調整するため調圧弁を使用する。この調圧弁は一般の機械的な減圧弁と異なり、希望の圧力にセットすれば、ポンプの圧力が降下しても一定の圧力を供給できるようになっている。希望する圧力をコアの上流側にセットすると、ガスはコア中を透過するが、下流側に保圧弁を設置して、下流側における圧力をも常に一定に保つようにした。この結果、上流圧、下流圧の設定が容易になり、希望の上下圧力を設定して流量を測定すれば、ただちに浸透率が求まるようになっている。

2.4 圧力調整および測定器類

本装置には圧力計7個が据付けられている。上流、下流側圧力計としては精密圧力計を使用し、上流側は最大圧力200kg/cm²、最小目盛0.2kg/cm²、下流側は最大100kg/cm²、最小目盛0.1kg/cm²のものを使用した。また、上流側圧力と下流側圧力の差が0.3kg/cm²以下で、精密圧力計でも読み取りが困難な場合は、高圧水銀マンオメーターで読み取るようになっている。その他、圧力の調整、開閉にはニードルバルブを使用した。

2.5 流量測定器

流量の計測は、浸透性の良い岩石の場合流量が多くなるので、湿式回転流量計（1回転5l、あるいは1lのもの）を用いた。浸透性の低い岩石では流量が少ないので石陰膜流量計を使用した。

3. 試料および実験方法

3.1 試料岩石

本実験に用いた試料は、コア採取により得られた油層の凝灰質砂岩、または人工砂岩である。これは直径2cm長さ約5cmの円筒形コアとして成形し、両端面が軸方向に対して直角となるように研磨した。試料の油分はソックスレー抽出器で抽出洗浄し、乾燥器内で100°C 1時間保持した。この試料の表面はゴムスリーブとの間の漏れを防止するため、エポキシ樹脂で薄く被覆した後使用した。なお、試料の浸透率および孔隙率は次表に示す。

Table 3.1

試料名	産地	岩質	浸透率	孔隙率
A	下五十嵐	凝灰質砂岩	1.22md	16.9%
B	下五十嵐	凝灰質砂岩	1.44md	19.3%
C	東新潟	凝灰質砂岩	242 md	23.2%
D		人工試料	663 md	18.0%

3.2 実験方法

3.2.1 試料岩石の加圧法

地下の圧力を再現する目的で、円筒形試料の周辺部からゴムスリーブを介して封圧を加えるには、まずバルブV₁₆を開き、V₁₅、V₁₄、V₁₃、V₁₂は閉じて加圧ポンプHへ水を導入する。次にV₁₆を閉じ、V₁₅、V₁₄、V₁₃、V₁₂を開いて、加圧ポンプHを作動させ、水をゴムスリーブの周囲に送り込む。この全配管系内の空気がなくなるまで上の操作を繰り返す。次に試料を加圧するためV₁₆、V₁₄、V₁₃を閉じ、V₁₅またはV₁₂を個々に開閉して、軸圧または封圧を加える。この付加圧はG₅、G₄の圧力計により決定する。封・軸圧を同一にする時にはV₁₅、V₁₂をともに開いてやれば良い。

3.2.2 上下ガス圧の設定

ポンプまたはコンプレッサーによる元圧から調圧弁にガスを導入し、上流側の圧力を調圧弁により調整する。

(1) 調圧弁による上流側圧力の設定

V₁を徐々に開き、所望の上流側圧力になるように圧力計G₂をみながら調整する。圧力が高くなった場合には、調圧弁のセット圧が高いので、調圧弁内のガス圧をV₂を開いて逃がし、適切な上流側圧力とする。V₁は徐々に開かないと、調圧弁を出た圧力がサンプルに急激にかかるので、サンプルの破壊をまねくことがある。上流側圧力をG₂で確認後、精密圧力計G₃を使って上流側圧力を読むためにV₄を徐々に開く。

(2) 保圧弁による下流側圧力の設定

下流圧を決定するには、V₁₀を徐々に開き、所望の下流側圧力にするように圧力計G₇を見つつ調整する。下流側圧力を正確に読むには、精密圧力計G₈によるためV₉を徐々に開く。調圧弁、保圧弁の調整後に圧力差（上流側と下流側圧力の差）が微小な場合V₆を開いて、高圧水銀差圧計を利用する。

3.3 流量測定

上下圧力が安定すれば、回転湿式流量計、または石陰膜流量計を用いて、数回流量の測定を繰り返し、その平均を持って流量とした。

4. 実験結果およびその考察

4.1 基準浸透率

基準浸透率は、常圧下における岩石の空気浸透率をもって基準浸透率とした。基準浸透率の測定に用いた装置は、島津製作所粉体比表面積測定装置SS-100形を少し改良したものを使用した。この装置での水頭差は、最大240cm水柱とした。なお、この測定ではダルシーの法則が完全に成立することを確かめた。その測定結果はTable 3.1に示してある通りである。

4.2 高圧ガス浸透率の測定結果

高圧ガス浸透率の測定結果は、次式によってその浸透率を計算した。

$$K = \frac{Q_a \mu L}{(P_1 - P_2) \cdot A} \quad \text{ただし} \quad Q_a = Q_2 \cdot \frac{2P_2}{P_1 + P_2} \cdot \frac{Z_a}{Z_0}$$

$$\therefore K = \frac{Q_2 \mu L}{A} \cdot \frac{2P_2}{(P_1^2 - P_2^2)} \cdot \frac{Z_a}{Z_0}$$

K: 浸透率 (Darcy)

μ : 測定温度圧力における粘性係数 (cp)

L: 試料の長さ (cm)

A: 試料の断面積 (cm²)

P₁: 試料の上流側圧力 (atm)

P₂: 試料の下流側圧力 (atm)

Q_a : 試料中を流れる空気流量 (cc/sec)

Q_s : 試料から流出した P_s 圧力下の空気流量 (cc/sec)

Z_a : 平均圧力下での圧縮係数

Z_0 : 大気圧下での圧縮係数

この実験ではすべて室温の状態で行なった。高圧ガス浸透率の測定でも、上に記したダルシーの式が成立する範囲で実験が行なわれなければならないので、上流側の圧力と下流側の圧力とを変化させてこの結果を確認した。

4.2.1 低浸透率岩石について

本実験で使用した岩石のうち、浸透率の低い岩石と浸透率の高い岩石では、その性格がかなり変わっているのです。まず、低浸透率の岩石について説明する。低浸透率岩石は基準浸透率が $1 \sim 2$ md である。この実験では軸圧と周圧をほぼ等しくして実験を行なった。岩石に加わる圧力は $10 \sim 160 \text{ kg/cm}^2$ まで変化させて浸透率の測定を行なった。また流体の平均圧は、 $10 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ の数段階に分けて実験を行なった。この結果は Fig. 3, 4, 5, に示してある。透過ガスは空気、メタン、アルゴンガスの3種類について行なった。これらの結果から、それぞれガスによって浸透性の変化が現われ、メタンガスの場合流体のガス圧によってかなり浸透性が変化するが、空気の場合にはその変化は割合少ないことが判った。外圧の影響についてはこの図では判断しにくいので、それぞれ外圧と流体圧との差をとって、その浸透率の変化を調べた。また、Fig. 6, 7, 8 はこれを示すものである。この図では、縦軸に基準浸透率に対する高圧ガス浸透率の100分率をとった。この結果、内圧と外圧の差に高圧ガ

Fig. 3 The Relation between Confining Pressure and Permeability of Air

Fig. 4 The Relation between Confining Pressure and Permeability of Methan

Fig. 5 The Relation between Confining Pressure and Permeability of Argon

ス浸透率が一義的に依存することが判った。しかもガスの種類による影響はほとんど認められない。

4.2.2 高浸透率岩石について

高浸透率の岩石では、とくにメタンガスの場合、ガス圧の影響が著しい代りに、岩石に加える外圧の影響はあまり大きくない。外圧の影響をみるために、前項と同じような方法で整理してみると、Fig. 9, 10, 11, 12, 13, 14に示すようである。この結果は低浸透率岩石の場合と著しく異なり、外圧と内圧の差による浸透率の変化はほとんど認められない。また、その代り内圧の違いによ

Fig. 6 The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Air **Fig. 7** The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Methan **Fig. 8** The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Argone **Fig. 9** The Relation between Cnfining Pressure and Permeability of Air

て浸透率はかなり変化することが判る。たとえばメタンガスについていえば、内圧 10.8 kg/cm^2 の時は浸透率比が圧力差のいかんにかかわらず65%程度を示し、平均圧 51.0 kg/cm^2 の時にはその値がほぼ40%位を示す。いい換えれば、ガス圧の変化によって、その浸透率が著しく変化していることをはっきりと示したものである。人工試料については Fig.11, 14, に示したが、高浸透率岩石と同じような結果を示した。ただし、この場合ガス圧の大きさによる浸透率変化はあまり大きくなかった。

4.2.3 低浸透率岩石と高浸透率岩石についての考察
以上2つの実験結果に著しい差が認められたのはなぜ

かということを考えてみよう。低浸透率岩石では孔隙径が小さく、かつ実際の行路長はかなり長いと思われる。これに比較して高浸透率の岩石では孔隙径は大きく、行路長も前者に比較して短くなるだろう。もし外圧が加わり、両者のかさ体積が等しく歪んで孔隙の断面に変化を及ぼしたとしても孔隙断面の総計では孔隙径の大小にかかわらず、ほとんど両者の断面が等しいと考えられるが、孔隙細管の周囲長は孔隙径が小さく、同一断面中に存在する孔隙細管の本数が多いほど、変化も多くなり、同じ流量を透過させる場合差圧が大きくなり、浸透率の変化は大きくなるだろうと考えられた。この関係は Fig. 3,

Fig. 10 The Relation between Confining Pressure and Permeability of Methane **Fig. 11** The Relation between Confining Pressure and Permeability of Air **Fig. 12** The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Air **Fig. 13** The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Methane

4, 5 と Fig. 9, 10, 11 から明かにすることができた。また低浸透率岩石では、浸透率の変化が内外圧の差にのみ依存するという結果が Fig. 6, 7, 8 のグラフから認められたが、これは孔隙の変形は内外圧の差によることが大きいことを意味し、かなり常識的な判断と一致した。これに対して高浸透率岩石では、Fig. 12, 13 にみられるように内外圧の差にのみ依存するのではなく、かなり透過するガス圧によって浸透率が変化している。これは前にも述べたように、孔隙径が大きく周辺長の影響は余り大きくないので、かえってガス圧変化による Klinkenberg⁸⁾

効果がみられるように思われた。

Fig. 14 は同じ高浸透率試料の人工岩石に対するもので割合に流体の圧力による変化は少なく、内外圧の差に依存する傾向が強くなっている。これは結合剤がエポキシ樹脂で弾性率大きく、かつ砂とフライアッシュが構成粒子になっているので、孔隙径は大きいとその変形も大きく、この影響が現われたものと思われた。

4.2.4 3 軸圧縮下における岩石の浸透率変化

岩石に対する周囲からの圧力と、流れの方向に直角な軸圧の影響を見るために、軸圧を一定にして周圧を変化

Fig. 14 The Relation between Permeability Ratio and Differential Pressure on Air

Fig. 15 Effects of Radial Pressure on Permeability of Air

させ、その浸透率の変化を見た。また周圧を一定にして軸圧を変化させ、浸透率の測定を行なった。この結果は Fig.15, 16, 17に示すようである。Fig.15は円筒コアに対して周圧がどのように影響するかを見たもので、浸透率が低い場合にはかなり変化することが判った。またこの実験では、岩石変形の履歴を調べる目的で圧力を増加させた後、再び圧力を減少させてその浸透率変化を調べてみた。この結果、岩石歪の履歴が浸透率にいくらか影響するものと思われた。これに比較的高浸透率の岩石で

Fig. 16 Effects of Axial Pressure on Permeability of Air

Fig. 17 Effects of Axial Pressure on Permeability of Air

は周圧の影響は少ないが、履歴現象は認められた。

Fig.16はこれを示した。Fig.17は軸圧の影響を調べたものであるが、これは浸透率にほとんど影響を及ぼさな

かった。

5. 結 言

以上の結果をまとめて報告すると、次のようなことがいえる。

(1)低浸透率の岩石では岩石に加える圧力の影響が著しく大きい、高浸透率の岩石ではその変化が非常に小さい。この結果はすでに J. Vairogs⁹⁾ 等によって最近報告された結果とも合致している。

(2)低浸透率岩石では高圧浸透率の変化は主として、内圧、外圧の差による孔隙径の変化に依存するものと考えられた。高浸透率の岩石でも同じように内、外圧の差によって管径の変化が起ると思われるが、孔隙径が大きいのでその影響は少ない。

(3)ガス体の圧力の影響は前に報告したように高圧ガスの Klinkenberg 効果によるもののようで、高浸透率岩石についてその状態が認められた。低浸透率岩石の場合にこの影響があまり認められないのは、岩石の孔隙の影響が著しく大いためと考えた。

(4)軸圧、周圧の影響に関しては、低浸透率岩石では軸圧の影響がほとんど認められないのに反し、周囲からの圧力の影響が著しく大きい。またこの場合、岩石の歪はたとえば最高圧力 140kg/cm^2 で歪 1.0×10^{-4} 変化であるから、長さの歪としてはほとんど無視しても良いためであろう。

6. 謝 辞

本研究に際して試料の提供および御助言をたまわった石油資源開発株式会社技術研究所の各位に深謝の意を表わす。

References

1. The Petroleum Publishing Co. (1972) International Petroleum Encyclopedia, p.212
2. D.J. Timko, W.H. Fertl, (1972) World Petroleum, 175(6), 76
3. W. van der Knaap, (1959) Petrol. Trans. AIME 216 p.129, (1960) Erdöl und Kohle (1960) 13(5) 305
4. I. Fatt, (1958) J.P.T. March, 64
5. G.L. Chierici, G.M. Ciucci, F. Eva, G. Long, (1967) Proceedings of the 7th World Petroleum Congress, p.309
6. I. Fatt, D.H. Davis (1952) Petroleum Trans. AIME 159, p.329
7. B. Wilhelmi, W.H. Somerton, (1967) Soc. Petroleum Eng. Journal, p.283
8. L.J. Klinkenberg (1941) Drilling and Production Practices, A.P.I., p.200
9. J. Vairogs, C.L. Hern, D.W. Darcing, V.W. Ihoades (1971) J.P.T., Sept. p.1161