茂原天然ガス田の相対的滲透率*

—相対的滲透率の研究—

田 中 正 三**
谷 口 啓 之 助***

(昭和27年12月19日受理)

On the Study of the Relative Permeability in the Mobara Gas Field

By

SHOZO TANKA, Keinosuke TANIGUCHI

Abstract : The objects of this investigation are the measurements of relative permeability of the sands in Mobara Gas Field and the improvements of the technique and apparatus used on the experiments.

The results obtained from the experiments are given on Fig. 3 and Fig. 4. Fig. 3 shows water permeabilities in the case of very low value, but the writers have not enough data to explain on the factors affecting on the low values.

1. 緒 言

本研究においては、千葉県長生郡茂原天然ガス田のガス層より採取したガス砂の相対的滲透率の測定を行い、同時に相対的滲透率の測定法および実験装置に関する実験研究を行った。

2. 測定装置および測定法

相対的滲透率の測定装置および実験法に関する論文は、本論文に直接引用したほか、数多く発表されているが、本研究において取り扱う水とガスの相対的滲透率の測定には、次の如き方法がある。

- ガスと水を空気圧縮機またはポンプを用いて、同時にコア内を流動せしめて、おのおのの相対的滲透率を測定する方法。
- 水を予めコア内にしみ込ましておいて、しかる後空気を流し、水の各飽和率に対応する空気の相対的滲透率を求める方法。
- 空気または水のみを通す素焼板を用いて、コア内の水の飽和率を所定のものにしておいてから、素焼板を通して、空気または水を流し、各水の飽和率に対する空気または水の相対的滲透率を求める方法

本実験においては B. H. Caudle 氏¹⁾が用いた装置に模して、第1図に示した測定器を作り、aの方法で実験

第1図 相対的滲透率測定器

を行う予定であつたが、水を送り込む装置が不完全であつたため、ガスの相対的滲透率はbの方法で、水の相対的滲透率の測定はcの方法を用いた。

(i) ガスの相対的滲透率の測定 測定装置としては空気滲透率を測定する装置をそのまま用いた。実験順序を次のべる。

(1) コアホルダー内に、水で予めある程度の湿りをもたしてあるガス砂を突き固める。

(2) 圧縮空気で圧力を加える。圧縮空気の圧力がある大きになると、水が泡状となつて、コアの流出面か

* 文部省科学研究費による研究

** 秋田大学鉱山学部助教授

*** 同上 助手

1) B. H. Caudle, R. H. Slobod and E. R. Brownscombe, Further Developments in the Laboratory Determination of Relative Permeability, Journal of Petroleum Technology, Vol. III, No. 5, (May, 1951):

ら流出し始める。この時の圧縮空気の圧力は、コアの毛細管圧力とも考えられるものである。

(3) コアホルダーを測定装置に入れ、前に測定した圧力以下で空気を流して、岩石の空気の相対的滲透率を測定する。

(4) コアホルダー内の砂を時計皿に取り出し、その重量を測り、次いでそれを乾燥して再び重量を測り、両者の差し引きから、コア内に含まれている水の重量を求める。この実験の精度からみて、水の比重を1として取り扱った。

(5) 水の体積をコア内の空隙で割ることにより、水の飽和率が求められる。かくして各水の飽和率に対応する空気の相対的滲透率が求められる。

(ii) 水の相対的滲透率の測定 第2図に示した測定器を用いた。この測定器は第1図の装置の接手管の所に、素焼板をデコチンスキーセメントで固定したものである。

第2図 相対的滲透率測定器 (素焼板使用)

実験順序を次に述べる。

(1) コアホルダー内に、水で予め湿りをもたしたガス砂を突き固める。

(2) 測定器を第2図の如く組立てる。

(3) 高い所に置いた水槽より水を流下させると、水の流入口における水の圧力は約18cm水銀柱、水は水で飽和された素焼板を通過してコア内に入り、下流側の素焼板より流出してくる。流出した水を濾紙にて吸い取り、その重量を計つて、流量を求める。圧力流量等より相対的滲透率を計算する。この場合も水の比重を1として取り扱った。また素焼板を水が通る時の圧力損失は、予め測定しておく。

(4) コアホルダーより砂を取り出し、前と同様にガス砂の飽和率を求めた。かくして、各水の飽和率に対応する水の相対的滲透率が求められた。

aの方法で実験を行うために測定器を作り、その測定器をそのまま素焼板を使用して測定する実験に用いた結果、水の飽和率を90%以上にすることが困難であつたので、90%以上の飽和率に対する水の相対的滲透率は、次の如くして求めた。

(1) コアホルダー内に砂を詰め、第1回の如く装置を組立て、水を流して水の滲透率を求める。

(2) コアホルダーからガス砂を取り出し、水の飽和率を求める。

ガス砂の中に保存してある空気は、完全に水により押し出されることなく、1部はコア内に留まるから、各実験ごとに異つたガスの飽和率に対する水の相対的滲透率が求まる。しかしかかる方法では、水の飽和率を調節して、それに対応する水の相対的滲透率を求めることはできない。

3. 実験資料

ガス砂として、千葉県長生郡茂原天然ガス田の深度350m~450m、地層 $U_4 \sim U_6$ より採取せるものを用いた。塩水の代りに秋田市の水道の水を用いた。なお水のなかに溶解している空気は抜き取つてない。天然ガスとして、空気を用いた。

4. 実験結果

空気の相対的滲透率の測定結果は第1表と第3図に、水の相対的滲透率は第2表と第3図に示した。なおパーセント相対的滲透率を第4図に示した。パーセント相対的滲透率を計算する時、絶対滲透率の値を2,900mdとした。

第1表 空気の相対的滲透率

孔隙率%	飽和率%	滲透率* md	パーセント 滲透率 %
47.6	77.0	50	1.72
45.1	72.1	248	8.55
45.9	70.1	451	16.00
44.4	64.9	581	20.00
42.8	61.3	791	27.30
44.7	56.7	950	32.80
46.1	56.1	1160	40.00
45.3	51.8	1550	53.70
45.5	51.1	1690	58.40
45.6	46.5	2200	75.80
45.2	37.2	2360	81.30
45.0	21.8	2690	92.80
46.6	12.6	2820	97.30
.....	0	2900	100.00

* 滲透率の値の有効数字は3桁である。

第2表 水の相対的滲透率

孔隙率%	飽和率%	滲透率 md	パーセント 滲透率 %
43.1	95.5	27.6	0.952
40.8	94.8	24.8	0.852
41.0	93.1	19.0	0.652
42.2	86.6	10.3	0.355
41.4	77.2	5.85	0.202
42.5	70.5	4.15	0.143
41.7	56.1	0.584	0.020

第3図 空気および水の相対的滲透率

第4図 空気および水のパーセント相対的滲透率

5. 実験結果の検討

(i) ガスの相対的滲透率 予めある程度の湿りを持たして、コアホルダーに突き固めた場合、その孔隙率は約45%程度となつた。しかしながら茂原のガス層の孔隙率が、45%程度であるか否か疑問である。Leverett氏²⁾の実験で砂をコアホルダーに填めた場合、第3表の如くなっている。この記録を参照するに、本実験では、手で突き固めたのであるが、十分に緻密に突き固められていると考えられる。

第3表 砂の孔隙率および滲透率

砂の 番号	篩 分 析 %			孔隙 率 %	滲透率 darcy
	mesh 100~200	mesd 200~325	325mesh 以下		
I	100	0	0	40~42	3.2~6.8
II	50	25	25	35	1.75
III	25	25	50	45	1.04

また F. G. Miller氏³⁾によれば 14~28, 28~35, 35~48, 48~65, 65~100, 100~200, 200~325meshの砂をおのおの 11.0, 8.7, 11.0, 11.0, 12.1, 22.0, 24.2%の割合で混合したものを、材料強弱試験に使用する試験機で、1,000lb/sq.in. の圧力でコアホルダーに押し固めた時、砂の孔隙率は27.3%となつた。もちろん砂の孔隙率は砂の粒子の大きさ、均一性等により左右されるが、Miller氏の実験結果により考えるに、ガス層が受けると同じ程度の大きさの圧力で押し固めなければ、ガス層が持つと同じ程度の孔隙率を、実験室内のコアホルダー内において得ることは困難ではないかと考えられる。従つて本実験において取り扱う孔隙率は、ガス層の孔隙率より大きいと考えられるから、求められた相対的滲透率の値は、ガス層の滲透率より大きいと思われる。

次に測定結果を検討してみるに、その結果が比較的正しく曲線上に分布するのは、その飽和率が50%~65%の間である。その原因を考えるに、コアの飽和率が50%~65%の範囲においては、毎回の実験において、湿り具合が適当であるために、コア内部の砂の分布状態が大体同じになるか、または砂の表面は附着している水により、空气の通路が滑かとなり、砂の配列状態・砂の形状による影響が小さくなるためであると思われる。

50%以下では、その求められた結果は、比較的大い範囲に分布し、(表および図には、その代表的な数値を掲げた) 飽和率が30%以下では、その傾向が大である。飽和率が50%以下の場合には、コア孔隙率はほとんど同じでも、毎回の実験におけるコア内部の砂の分布状態および砂の形状が異なるため、その影響を受けて滲透率が異なつてくると思われる。コアの飽和率を測定する方法としては、電氣的に測定する方法と、蒸溜乾燥してその重量を測定する方法とがあるが、砂の分布状態・砂の形状による影響を避けるために、砂の飽和率を測定する方法としては、電氣的に測定する方法を採用することが良いと思われる。

(ii) 水の相対的滲透率 水の相対的滲透率の結果をみて感ずることは、その相対的滲透率が甚だ小さいことである。すなわち水の飽和率が95.5%になつても、そのパーセント滲透率は1%以下である。空気と水の相対的滲透率の実験は、砂については Muskat 氏⁴⁾等が行い、砂岩については Botset 氏⁵⁾が行つている。Muskat 氏等の実験に用いられた砂の大きさは、70~200mesh、滲透率は17.8darcy。Botset 氏の実験に用いられた砂岩は、篩分

2) Leverett: Flow of Oil-Water Mixtures through Unconsolidated Sand, A.I.M.E.(1939), 132, 149.
3) F. G. Millers: Steady Flow of Two Phase Single-Component Fluids through Porous Media, Journal of Petroleum Technology, Vol. III, No. 7, (June 1951).

4) M. Muskat, R.D Wyckoff, H.G.Botset and M. W. Meres: Flow of Gas Liquid Mixtures through Sands, Trans. A.I.M.E.(1937), 123, 69
5) H.G.Botset: Flow of Gas-Liquid Mixtures through Consolidated Sand, Trans. A.I.M.E.(1940), 136, 91.

析の結果によれば、80~90mesh のものが40%程度あり、その滲透率は0.495darcyである。砂の粒子の大きさが異なるので、その測定結果を比較対称して、直ちに結論を導き出すことはできぬが、本実験における測定結果が甚だ小さい値をもつことに対しては、検討を加える必要がある。この場合、実験装置・実験方法についても同時に考えなければならない。

前に述べた如き方法により、90%以上の飽和率をもつ砂の滲透率を測定したのであるが、かかる方法により滲透率を測定するとコア内の水の飽和率は、境界効果(end effect)により一様ではなく、コアの両端においては、その飽和率は中央部より大きくなっている。境界効果を少なくするため普通コアホルダーの上流側・下流側に、それぞれコアと同程度の滲透率をもつ物質を填めておくか、またはコアを3ヶ所の部分に分け、中央のコアについて相対的滲透率を測定する^{1),6)}。本実験に使用した装置も、境界効果を小さくするように製作されたもので、本実験についてもコアホルダーの前後のホルダー内にガス砂を填める予定であつたが、水を流動せしめると圧力計へ通ずる孔へ砂が入り、このため砂よりできたコアの1部が崩れ、測定効果が甚だ不確なものとなるので、ガス砂はコアホルダーにのみ填め、その前後のホルダーには48meshの砂を填めた。それ故境界効果のためにコア両端の飽和率は著しく大きくなった。従つてコア全体の飽和率は90%以上になつても、中央の部分の飽和率はそれよりも小さく、そのコアより求められた測定結果は、コアのすべての部分が一様に90%以上になっている場合に比べ、甚だ小さいものと考えられる。

次に水と空気の相対的滲透率を測定する場合、コアが完全に水で飽和した時の滲透率を測定することを必要とする。コアを完全に水で飽和する方法としては、各種の方法が用いられているが、本実験はLeverett氏²⁾が用いた方法に従い、上端より真空ポンプをかけ、下端より水を吸い上げてみた。しかし測定器のネジ接続の部分より空気が入り、完全に水で飽和することに失敗した(測定器は水銀柱で20cmの圧力までは、完全に気密にすることができた)。コアホルダーの各部分の接続法としては、ネジで接続するもの、ボルトで接続するものの2種類があるが、ネジの部分の長さが長い場合か、ネジが正確に切られている場合を除き、ボルト締めする方がよいと思われる。以上の理由により、水による絶対

滲透率の測定ができなかつたので、空気を用いた場合の絶対滲透率と水による絶対滲透率が同じであるか否か、また異つていればいかなる原因であるかという点について、充分な検討ができなかつた。従つて水の相対的滲透率が小さいという点についても、完全な解明が得られなかつた。

(iii) 素焼板を使用した測定器 素焼板を使用した測定器については、I. Fatt 氏と H. Dykstra 氏⁷⁾が発表した論文がある。本実験で使用した素焼板の滲透率は4.89mdであつた。この素焼板を水で飽和すれば、水銀柱で約20cmの圧力まで空気が流出することはない。ある飽和率をもつコア内の空気は、それ以下の圧力が加えられる場合には、外部に流出することがない。それ故水を流した場合、全圧力損失より素焼板における圧力損失を差し引けば、各水の飽和率に対する水の相対的滲透率が得られる。この装置を用いた場合、素焼板の滲透率がどの程度の大きさの時、最も精度のよい実験結果が得られるかということが問題となる。素焼板を水が通る時生ずる圧力損失が、コアを水が通る時生ずる圧力損失に比して大きい場合、実験の精度は落ちる。本実験に用いられた素焼板は、その滲透率が小さく、大きな圧力損失を生ずるので、不適当なものであると思われる。今後各種の滲透率をもつ素焼板を製作試用してみなくてはならぬ。

次に素焼板を使用する時、その流量が甚だ小さいので(本実験においては圧力差が水銀柱で17cm程度の時、その流量はコアの飽和率により異なるが、0.015cc/sec~0.008cc/sec程度の少量であつた)その正確な計量が問題となる。本実験で行つた如く、濾紙で吸い取る方法は蒸発による損失があるので不正確となるから、今後製作する装置では、Fatt氏が用いた如く目盛付ビベットを使用する考えでいる。

6. 結 語

相対的滲透率の測定は油層、ガス層の開発に缺くべからざるものであり、その重要性は十分に認識されているが、それについての実験研究は少ない。本研究は米国の文献を参考にして行つたが、その装置・方法には不備な点が多々あるので、今後引き続き研究を行い実験精度を高めて行く予定である。終りに本研究に御援助下された大多喜天然ガス松浦政男先生に感謝の意を表する。

6) T. M. Geffen, W. W. Owens, D. R. Parrish and R. M. Morse: Experimental Investigation of Factors Affecting Laboratory Relative Permeability Measurements, Journal of Petroleum Technology, Vol. III, No. 4, (April, 1951).

7) I. Fatt and H. Dykstra: Relative Permeability Studies, Journal of Petroleum Technology, Vol. III, No. 9 (September 1951).