

最近における坑井探査 技術と貯溜岩の物性について

加藤 正和

は し が き

石油およびガスを目的として試掘井または探採掘井を掘き出した場合に、それらが稼行に足るものになるか否かを判定し、さらに開発計画をたてるために必要な貯溜岩の性質に関する情報を収集する手段としては、一般に次の5つがある。すなわち

- (1) コア試験
- (2) 電気検層
- (3) でい水検層
- (4) 掘管テスト (DST)
- (5) 産出テスト

である。これらのテストによって求められる各種の情報についてまとめたのが表1である。またこれらのテスト結果の石油鉱業における利用面をまとめたのが表2である。

石油・ガス探鉱の場が平原下や海洋にうつるにしたがって、最近の坑井探査技術の発展はめざましい。このような各種のテスト手段についての解説は成書^{1), 2)}にゆずることとし、本稿においては、比較的最近においてこれらのテスト法に関連して問題となっているいくつかのテーマについて個別にとりあげることとする。

1 コア試験の孔げき率と検層解析の孔げき率との関係について³⁾

わが国のおもな油層、ガス層はけつ岩質砂層であり、多量の粘土鉱物を含有する。このような岩石のコアについては、まず油分をトルエンで除去した後、これを

表1. 油ガス層 評価の手段と情報

テストの種類	求められる貯溜岩および貯溜岩 + 流体システムに関する情報
コア試験	孔げき率 油水飽和率 絶対浸透率 有効浸透率 相対浸透率 毛細管圧力など
電気検層	孔げき率 水飽和率 粘土含有率 岩質組成 浸透率 (半定量的) など
でい水検層	油ガス存否の定性的評価
掘管テスト	油ガス存否の定性的評価および有効浸透率
産出テスト	生産能力の評価 有効浸透率 地層障害など

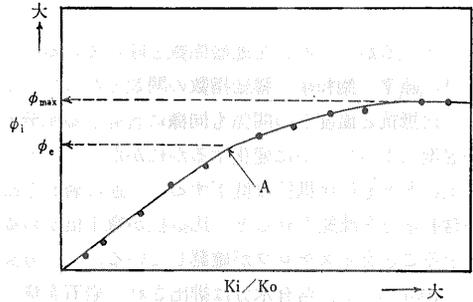


図1 有効孔げき率を求めるための 孔げき率-浸透率プロット

乾燥し、気体膨張式または水銀圧入式測定器によって孔げき率を測定する。しかし試料を高温で乾燥することによって、試料中の粘土のなかの水までが追い出され、粘土の容積は自然状態のときよりも収縮して小さくなる。従って地下にあるときの孔げき率よりも、大きな孔げき率が求められる。

これに関する補正法の1つとして、次のようなものがある。すなわち試料をはじめ塩水で飽和させておき、その後デシケーターで少しづつ乾燥を行ない、乾燥中の任意の時点で試料の浸透率と孔げき率を測定する。試料のはじめの浸透率を K_0 、各時点の浸透率を K_i ($i=1, 2, 3, \dots$)、孔げき率を ϕ_i ($i=1, 2, 3, \dots$) とし、 $\phi_i - K_i/K_0$ の関係をプロットすると一般に図1のようなカーブがえられる。この図における屈折点Aに対応する孔げき率を ϕ_0 とすると、この屈折点における試料の状態は岩石中の流動可能な水は除去されてしまったが、粘土鉱物の吸着水はそのまま保存されている状態であり、これが天然の状態における適正な孔げき率を示すものと考えられる。

一方、最近における放射能検層法の発展により、現在のところ、けつ岩質砂岩について最も正確な解析法と評価されているのは、放射能検層データを利用した残留炭化水素補正法⁴⁾であるが、これから求められた孔げき率の値は、一般に上記の屈折点に対応するコア孔げき率の値とよく符合する。わが国で長年にわたって親しまれ

表2. 油ガス層 評価情報の利用面

テストの種類	求められた情報のおもな利用面		
	坑井の仕上げ判定	埋藏量の計算	生産能力生産推移の予測
コア試験	△	△	○
電気検層	○	○	
でい水検層	○		
掘管テスト	○		
産出テスト		△	○

○印は広く利用されている情報
△印は副次的に利用されている情報

てきたマイクロ検層の解析によって求めた孔げき率の値は 慣用のコア試験から求めた孔げき率の値 (すなわち図1の ϕ_{max}) に近似する場合が多い。 ϕ_e は ϕ_{max} の 2/3ないし1/2にとどまることが多いようである。

2 炭酸塩岩における一次孔げき率と二次孔げき率⁵⁾

炭酸塩岩においては、一般に一次孔げき (粒間質孔げき) と二次孔げき (バグ、フラクチャーなど) とが注目される。 検層によってこれら2種の孔げき率を個別に評価するとともに、岩質組成を判定することもできるようになった。これは中性子検層と密度検層 (ガンマガンマ線検層) とは、孔げきの径や分布状態による影響がなく、地層の総孔げき率を測定するのに対して、音波検層は比較的均一に分布する小孔げきすなわち一次孔げきだけに応答するという現象を利用する。このタイプの解析に必要とする検層プログラムは次のとおりである。

- (1) 6 F F 40インダクションまたはラテロ ログ
- (2) プロキシミティまたはマイクロラテロ ログ
- (3) 密度検層
- (4) 中性子検層
- (5) 音波検層

実際にははじめに、地層密度 ρ_b 対中性子孔げき率 ϕ_N のプロットを行なう。図2においては大部分のポイントが石灰岩 (limestone) ラインの上にプロットされている。ただしポイント6には一部苦灰岩 (dolomite) が含有され、ポイント7は純粹の苦灰岩、ポイント12、13は砂岩 (sandstone) ライン上におちている。このようなプロットによって、各解析ポイントの岩質組成が判明するとともに、石灰岩ラインと苦灰岩ライン (砂岩ラインでもよい) の等孔げき率ポイントを結んだグリッドか

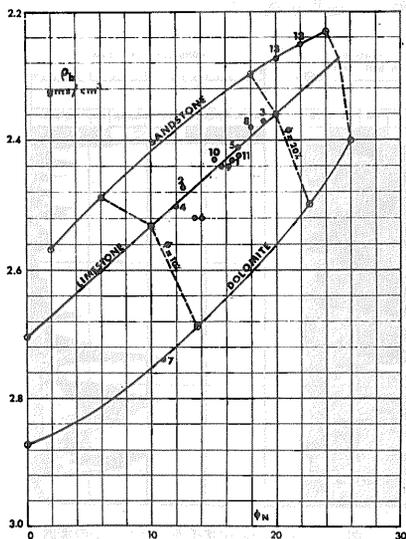


図2 地層密度 - 中性子孔げき率クロスプロット

ら、精度のよい孔げき率を求めることができる。

一方、地層の音波走行時間 $4t$ 対中性子孔げき率 ϕ_N プロットを行なうと (図3) 2、5、8、9のポイントのみがほぼ苦灰岩ライン上にプロットされ、その他のポイントは大小なり苦灰岩ラインに寄った方にプロットされている。

ρ_b/ϕ_N プロットと $4t/\phi_N$ プロットの状況がこのように大分異なっているのは、前記したように音波検層が孔げきのすべてに対して応答しないためである。ポイント11は ρ_b/ϕ_N プロットでは、その孔げき率は17%である。一方、 $4t/\phi_N$ プロットでは14%の孔げき率にとどまる。従って $17 - 14 = 3\%$ すなわち総孔げき率の約20%が二次孔げき率であり、この分は音波検層によっては探査できないのである。

3 地下および地表条件における コア中の油水分の変動について⁶⁾

地表まで回収したコア試料における油水分の飽和状態は、地下におけるそれらの賦存状況とは著しく異なっているのが普通である。地下の多孔質岩石は、まず掘さくでい水からの瀧過水によって洗じようされ、地層中の油分の多くは坑井の近傍から遠方へ駆逐される。ついで地下で採取したコア試料を地上まで採揚する間に、圧力の低下に伴って、コア試料内のガス (油に溶解していたガスを含む) が膨張し、油水分を追い出す。このような変化を例示したのが図4である。オイルベースの掘さくした場合には、水ベース (図4 a) に比較して地下における水飽和率と、地表で測定された水飽和率との間に大した変化がないといわれる (図4 b)。

外国の文献においては、コアで測定した油水分の飽和率と掘さく前の状態における飽和率との関連に関する研究がいくつか公表されているが、一般的に使用できるものとするためには、さらに多くのデータが必要だと考えられる (図5)。

4 ムーバブルオイル プロット (MOP) について⁷⁾

現在までに開発されている油層評価の手段としての検層法は、孔げき率および水飽和率の算出が主体となっており、浸透率の評価という点ではまだ十分に定

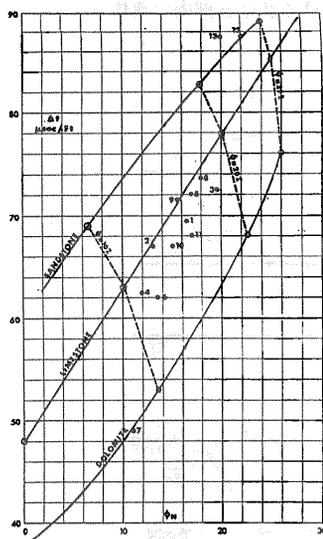


図3 音波走行時間 - 中性子孔げき率クロスプロット

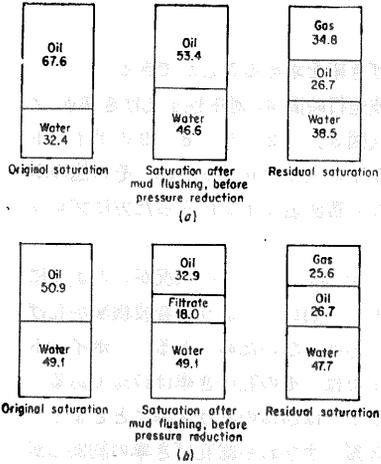


図4 地下および地表におけるコア中の油水分の変動(模式図)

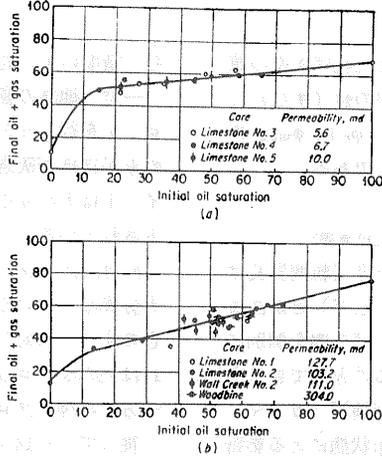


図5 地下および地表におけるコア中の油水分相関図

量的な手段は確立されていない。ムーバブルオイルプロットは、地層の浸透性の大小の評価手段として半定量的ではあるが、現在までのところ最も優れた方法である。前項においても述べられているように、坑井の掘さく時には、掘さくでい水からの濾過水が貯留岩内へ侵入し、貯留岩内の油やガスを坑井の近傍から追いやってしまう(これをフラッシングという)。フラッシングによって置換される油やガスの量は、掘さくでい水の比重が同じならば、貯留岩の浸透率にほぼ比例する。

MOPの考え方を模式的に示したのが図6である。はじめに単位容積の岩石を考えるものとする(図6 a)。この岩石は ϕ なる孔げき部分と、 $1-\phi$ なるマトリックス部分とからなる(図6 b)。さらにこの孔げき部分は坑井を掘さくする以前においては水を含有する孔げき部分 ϕS_w (S_w は水飽和率)と炭化水素を含有する孔げき部分 $\phi(1-S_w)$ とからなる(図6 c)。でい水によるフラッシングを受けた後における孔げき部内の流体分

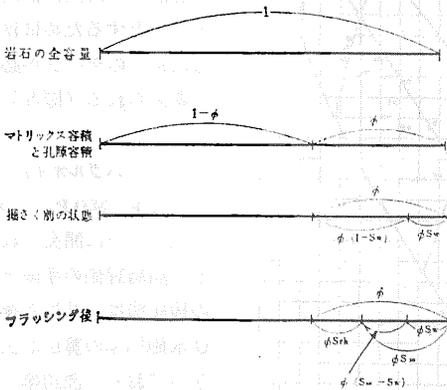


図6 ムーバブルオイルプロット概念図

布は、地層水と濾過でい水とを含有する孔げき部分 ϕS_{x0} (S_{x0} はフラッシングされたゾーンの水飽和率)とまだ残留している炭化水素によって占められている孔げき部分 $\phi(1-S_{x0})=\phi S_{rh}$ (S_{rh} は残留炭化水素飽和率)という状態になる(図6 d)図6 cと図6 dとを比較すると、 ϕS_{x0} と ϕS_w との差、すなわち $\phi(S_{x0}-S_w)$ が濾過でい水によって置換された炭化水素(movable oil)の量を示す。この値が大きい貯留岩は浸透性に富む貯留岩であるということになる。

実際には、 ϕ 、 ϕS_w および $\phi(1-S_{rh})$ の値を計算すれば、図7に示すように、3本のカーブの間隔の大小によって、移動可能な炭化水素および残留炭化水素の量がひと目で判明する。MOPを求めるためには、前出の残留炭化水素補正法¹⁾を利用することが望ましい。そのために必要な検層プログラムは

- (1) インダクションまたはラテロログ
- (2) プロキシミティまたはマイクロラテロログ
- (3) 密度検層
- (4) 中性子検層

である。MOPは現在、コンピューターによって連続的にプロットが行なわれるようになっている。

5 検層解析におけるコンピューターの利用²⁾

検層解析におけるコンピューターの利用としては、連続式ディップメーター(CDM)結果の高密度計算および油層評価のための総合的プログラムの開発の両面において近年著しい進歩を遂げた。

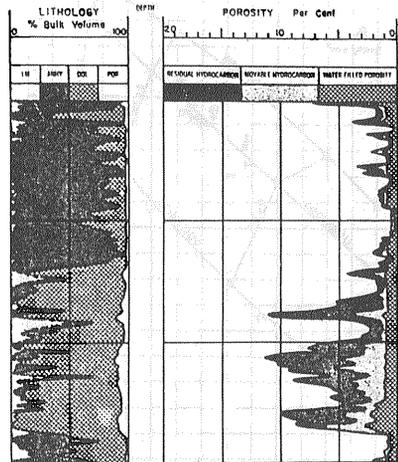


図7 ムーバブルオイルプロットの実例

CDMの記録から 1 mに3~4ポイントでいどを選び出して、コンピューターによって地層傾斜の方向と角度を計算するとともに、これを連続的にプロットする。これによって地質構造や断層、不整合の存在が明らかになるだけでなく、チャンネル、サンド・バー、偽層など様々なたい積構造が抽出され、たい積環境の推定にも有力な手段となっている(図8)。一方、油層評価のためのコンピュータープログラムとして、シユランベルジャー社が開発し、コマースナル・ベースで使用されているプログラムとして次の2つがある。

- a Shaly Sand Program
- b Shaly Dual Mineral Program

これらのプログラムはすでに約3年前から使用され300坑以上の坑井データの処理に利用されている。その結果、極端に坑内条件が悪い場合以外はかなり信頼できる成果をあげていると判断することができる。しかし現在のところ、わが国の坑井検層データについて総合的コンピューター処理を行なった例は数坑にしかすぎない。

Shaly Sand Programは、1つの主成分鉱物(普通は石英)と様々な含有量のけつ岩とからなる地層に適用される。このプログラムは、粒子密度がかなり一定している場合に適用することができる。Shaly Dual Mineral

Programは、2種ないしそれ以上の鉱物(主として石灰岩、苦灰岩、砂岩、硬石膏)に様々な含有量のけつ岩が加わった地層に対して適用される。これらのプログラムを適用するのに必要最小限の検層は、インダクション(またはラテロ)検層、密度検層、ガンマー線中性子検層およびプロキシミティ(またはマイクロラテロ)検層である。図9は Shaly Dual Mineral Programによってコンピューター解析を行なった結果のプリント例である。

(筆者は石油開発公団技術部)

参 考 資 料

- (1) 石油鉱業便覧：石油技術協会編 1963
- (2) 海洋石油開発技術：石油開発公団編 1969
- (3) 保泉忠夫：貯留岩の孔げき率および粘土含有率に関する研究 石技誌 33巻 6号 1968
- (4) 繁原・加藤・佐藤：貯留岩の有効孔げき率、粘土含有率および水飽和率の計算 石技誌 33巻 6号 1968
- (5) 加藤正和：坑井検層による炭酸塩岩油層の評価について 石油誌 13巻 1号 1970
- (6) Amyx J. W. et al: Petroleum Reservoir Engineering McGraw Hill Book Co. 1970
- (7) Millican M. Let al: Well Site Recording of Movable Oil Plot Schlumberger Well Surveying Corp. 1966
- (8) Computer Program for Log Interpretation Schlumberger Well Surveying Corp. 1968

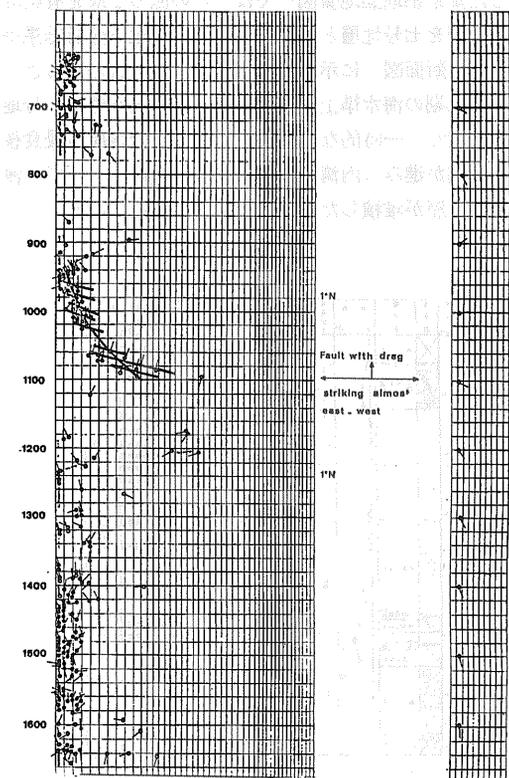


図8 CDMによるたい積パターンの判定

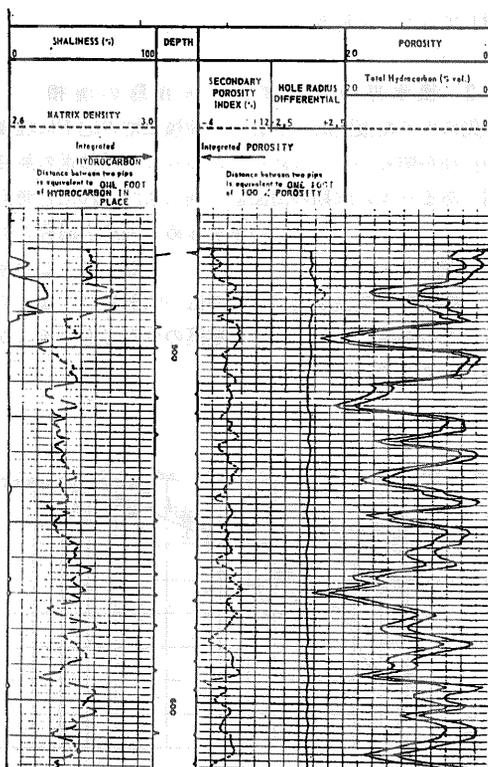


図9 コンピューター処理検層図