研 究 報 文

秋田県・山形県に於ける石油の第一次移動 (I)

First migration of petroleum in Akita
and Yamagata Prefectures

細 井 弘 (Hiroshi Hosoi) *

Abstract: The first migration, that is, migration of petroleum from the mother rock to the reservoir is more important in Japan than the second migration, because the regional migration is not possible on account of locally limited distribution of reservoir beds.

Assumed that the first migration is caused mainly by compaction of mother rock according to its burial, the quantity of migration can be given by reduction of porosity of the mother rock.

Therefore, the conception of "Potential of Migration (PM)" has been defined as the volume of fluids flowing from mother rock into the unit pore space capacity of reservoir rock.

The value of PM is determined by the volume & porosity of both reservoir and mother rocks, and the porosity of the mother rock before its compaction or burial.

After computing each value of PM in various exploration wells, the following fact has been found.

In oil productive areas, PM values are larger than 50, whereas in non-productive areas, they are less than 50.

From this fact, the assumption has been recognized as valid that the presence or absence of oil pool is mainly controlled by the condition of first migration.

1. 序 言

日本に於て石油の移動を考える時に、第一次移動の方が第二次移動より集油に対して遙かに支配的ではないかと云う疑問を筆者は数年来抱いていたが、之が疑問としてではなく一つの仮設としてその構想をまとめるに至つたのは庄内平野の余目油田の開発が大きな動機となつている。何故かという、余目油田は日本に於ける従来の常識からすれば石油の集積条件としては極めて悪い要素が多い。即ち構造は日本の大油田に見られるよ

* アラビア石油株式会社

(昭和37年9月5日受理)

うな適当な褶曲度を持つた背斜ではなく極めてゆるい dip を持つた隆起構造に過ぎない。又油層である砂層の一枚一枚は 極めて近距離で消滅するレンズ状を示しており、遠距離より石油が移動して来たとは 考え難い状態である。にもかかわらず 余目油田は稼行に足る油田として成立している 事実を見ると、余目に集油させたのは 石油の第一次移動の条件が良かった為と考えざるを得なくなつたのである。

処で、余目油田は 日本の油田の中で例外的なタイプに属するのかもしれない、筆者の考えではそうではなく 次章に述べるように、日本の油田はその貯溜岩の連続性に於て大なり小なり 余目油田的な要素を持つており、余目油田は極端ではあるがむしろ 典型的な代表としての性格を帯びているといえない事もない。

こういう観点から、日本の油田の集油を 支配する最も重要な条件は 第一次移動である と言う仮設より出発し、先づ 第一次移動の機構を分析して 移動量を数量的に把握する事につとめた。次に 第一次移動のポテンシャルを比較する目的で 第一次移動能力 (PM) という概念を設定し、之が 第一次移動に 関係する各要素の函数値として 表わされるような 数式を導き出した。

そして、秋田県・山形県油田地域の出油地域及び 無出油地域に於て、上に述べた 第一次移動能力 (PM) の値を実際に計算して見た処、PM の値の大小と出油・無出油の事実とは 略々一致する事が判つた。此の結果に依り当初に述べた仮設、即ち 日本の場合集油を 支配する最も重要な条件は 第一次移動である、 と言う事は妥当ではないかと考える。

本論で用いている 第一次移動とは、生成された石油が 他の流体と共に母岩より貯溜岩へ移動する段階を指して居り、第二次移動とは 貯溜岩内での石油の側方移動を 指す事とする。両段階は時間的にはオーヴァラップする事は考え得るが 本論では その事は 特に論議の対象とはならない。

尚、この研究に当り 御懇切な御教示を賜つた 東北大学岩鉱教室の牛島教授、加藤助教、田口、阿部、島田の諸氏及び石油資源開発 K. K. の石田副社長、中沢取締役、岡取締役、四十物部長、望月課長、樹下課長及び貴重な資料の借用を賜つた帝石秋田鉱業所 近野課長及び 有益な助言を与えて下さつた 石油開発酒田鉱業所探鉱課の 諸氏に対し深く 謝意を表する次第である。

2. 石油の regional migration の困難さについて

従来石油の移動について 色々論議されているが、その主役を務めているのは 矢張り 第二次移動についての議論である。即ち、貯溜岩内に 於ける 広地域の移動所謂 regional migration の問題である。

併し、日本の新第三系の油田に於ては regional migration は考え難い場合が多い。

そもそも、貯溜岩内に於て長距離を石油が 移動する為には 貯溜岩自体の平面的分布が 広地域に渉っている事、及び貯溜岩を含む地層が広範囲の傾動 (regional tilting) を起す事を必要とする。しかも 貯溜岩の平面的分布とは、単に岩質的な連続性をのみ意味するのではなく石油の移動に適した形質、即ち 孔隙率や 滲透率の広範囲の連続性を意味するのである。

こういう条件を充たす地域は裏日本油田地帯には殆どあり得ないと考える。

例へば、秋田県・山形県に於ける主要油層の一つである桂根互層の砂層を例にとると、之等は汀線或いは大陸棚縁辺に沿つて海退・海進等の直接作用に依るものではなく、海底の局部的高処(bank sill 等)の形態とこれに衝突する海流との組み合わせに依る砂の沈積が主たる成因と考えられる場合が多い。しかも、これ等のbankやsill等はその後の褶曲運動の幼胚核をなしている事が往々にして多いので、結果的には桂根層は現在の背斜構造を単位として局部的にその構造の周辺にのみ分布すると考える方が妥当のようである。

極端な例としては筆者等¹⁾が調査した秋田県由利郡の石脇背斜に於ては、背斜の西翼では互層は良く発達しているが東翼では砂層は殆ど痕跡程度の挟みを有するのみである。又、秋田市八橋油田に於ては背斜の南部(雄物川地区)に於ては桂根層が発達するが北部(高野・外旭川地区)に於ては殆ど認められない(帝国石油 K.K. 坑井資料に依る)。

又、裏日本油田地域のもう一つの主要油層である凝灰岩層は桂根互層より分布範囲の広い場合は少ない。併し、貯溜岩としての形質である孔隙の連続性になると砂層より遙かに劣る事が多い。特に浮石質の凝灰岩はそれ自体は高滲透率の場合が多いが、之は容易にベントナイト質に变り易いのでこの部分では滲透率は全く低くなる。とにかく凝灰岩はその構成鉱物の関係から粘土鉱物の影響の大小に依り滲透率は局部的に発達していて広い連続性は望めない場合が多い。

実際の例としては、山形県飽海郡吹浦油田²⁾に於て、主要油層は岩質的には油田全体に分布するが坑井数13坑の中実際に出油しているのは隣り合つた2坑(SK1, SK10)のみである。この2坑よりdown dipでは出水し、up dipでは又無出油となつている。そして各坑井の電検に依り孔隙率を計算してみるとこれ等の間には非常な差があり、明らかにpermeability trapを形成している事が確認された。

即ち凝灰岩は一見連続しているように見えるが局部的に滲透率の差を生じてむしろ石油をtrapする機会が多いと考えるべきであろう。

以上の例から見ても日本の油田の場合、貯溜岩中に於ける広範囲の移動距離は極めて考え難く、その移動距離は背斜の両翼基部から頂部迄がせいぜいであると考ええる。実際の数値としては、裏日本の新第三系の褶曲規模からすれば上記の移動距離は1000米以内であろう。

従つて石油の集積量は貯溜岩中の移動量よりもむしろ、母岩より貯溜岩への移動量即ち第一次の移動量に依つて直接支配されたと想像して良いであろう。

次章以下に述べる議論は上記の仮説を出発点として、第一次移動能力と集油との関係を求めようとしたものである。即ち、別の言葉でいえば第一次移動能力の大であつた個処の近傍に集油度の高い処があるであろうという仮説を出発点として議論を進め、結論に於てこの仮設が正しいか否かを確かめようとしているわけである。

但し、此の場合は貯溜岩内でin situに石油が生成されると云う考えや、母岩内で生成された石油の濃度、いわば石油化度等の差異については一応考慮より除外してある。

3. 石油の第一次移動の機構分析

第一次移動の能力を数量的に把握する為に先づ移動機構の分析を考えてみたい。第一

次移動については最近に於て三土³⁾及び石田⁴⁾の貴重な研究があり筆者も多大の示唆を受けたが、筆者の場合数量的把握の目的の為に第一次移動機構の分析に先立ち次の条件を前提とした。

(1) 第一次移動の移動方向は母岩中を垂直上方に移動し、上位の貯溜岩に入るものについて取り扱う。勿論母岩中を側方或いは下方に移動する要素もあり之については後章の結論に於て述べるが、普通の場合垂直上方への移動量が大部分を占めると考えても妥当であろう。

(2) 第一次移動を起す移動営力としては、母岩が堆積後埋没に依つてもたらされる圧密の為に生ずる孔隙容積の減少に依る絞り出しと考える。

移動営力としては他にも色々考えられるが上に述べた所謂圧緊水流のエネルギーが大部分であろうと云う事は Athy⁵⁾に依つて提案され Gussow⁶⁾に依つて発展し三土及び石田も之を支持しているが筆者も移動エネルギーの大半は之に依るものと考えている。

(3) 筆者が対象とした秋田県・山形県地域に於ける母岩としては下部天徳寺層相当の暗灰色泥岩及び船川層相当の黒色泥岩のみを取り扱った。その理由は、上記母岩は粒度組成等からいつて後に述べる如く埋没と圧密・孔隙率減少との関係に一定の法則を把握し易い事、又上記地域の油層の大部分は桂根層或いは上部船川層中にあつて、下部天徳寺乃至船川層の泥岩が母岩であると考えられる事に依る。

船川層相当の母岩については硅質である為圧密のありさまを把握するのが困難なので取り扱わなかつた。

以上の条件を前提として第一次の移動機構を時間的に経過を追つて分析すると次の通りになる。

先づ石油の原始母材物質たる有機物が泥岩粒と共に海底に沈積し終つた直後から、嫌気性の環境の下に石油への進化の第一歩、所謂石油化が始まると考える。石油化が堆積直後非常に早期に始まる事は Smith⁷⁾に依るルイジアナ沖及び Kidwell⁸⁾に依るヴェネズエラに於ける現世海底堆積物の研究からも想像を許されるであろう。

そして、泥岩の孔隙はその中に石油の母材物質を閉じ込めながら、上位に泥岩が堆積するにつれて段々深く埋没して行き、これの圧密作用に依り深く埋没した部分程孔隙率は減少し行くであろう。埋没の圧密作用に依る孔隙率の減少度は、細粒泥岩の場合或る程度の埋没深度迄は非常に敏感である。これは後章の実例を見れば良くわかる。此の孔隙率の減少が原始石油をその孔隙より排出し、孔隙率の高い上方へ移動させる営力であると解釈する。此の場合、移動する石油の物理的性質としては親水性の、共存する水との間に界面張力を持たない所謂 proto-petroleum の状態であると考えてのが妥当のようである。何故ならば若し現在の石油の如く疎水性のものであつたとすると、その相対滲透率の作用に依り母岩中に於けるような極めて飽和率の低い石油は移動困難で水のみ移動する結果となる筈だからである。

かくして母岩である泥岩が連続堆積して行く限り原始石油は埋没した深部より浅部へ順々に排出移動して行き海中に逸散して行くであろう。そして逸散を続ける限りその移動量は実質的な第一次移動量には参加していないわけである。実質的な第一次移動は母岩の上に貯溜岩が沈積し、更に帽岩となるべき泥岩が之を蔽つた時に始まると見做すべきである。之は極く当り前の事をわざわざ述べているようであるが、別の表現をすると、

母岩が厚い程良いという漠然とした常識は必ずしも正しくない事を意味する。貯溜岩の挟みなく泥岩の厚い連続堆積は石油の逸散量の多い事を同時に意味するからである。

上に述べた「実質的な第一次移動」の開始する直前、いい換えれば貯溜岩の堆積する直前の状態を模式的に描いたのが第1図に於ける左側のAの状態である。この状態を本論文に於ては「母岩の埋没前」という表現を仮にしたい。勿論この状態に於ても母岩の下部は埋没しているが、最上部は埋没前という意味である。

Aの状態に於ては、母岩中の孔隙率の変化は、その埋没深度に応じ第1図に見られるように浅部より深部に向い小さくなって行く。そして前に述べた如く或る程度の石油は逸散してしまっている。

次に、Aの状態に引き続き地層の堆積が行われ母岩上限の埋没深度が D_1 に達した時の状態が第1図右側に見られるBの状態である。

Bに於ては、母岩の層厚は埋没圧密に依つてAの時より減少している。又、孔隙率は母岩の上部より下部に向い減少して行く点はAと似ているが、Bの状態の母岩の平均孔隙率はAの状態のそれより勿論減少している。

此の時の孔隙率の減少こそ実質的に第一次移動のエネルギーとなるものである。

上記の孔隙率(孔隙容積)減少に依つて母岩より順次排出された原始石油が上位の高い孔隙率を持つ貯溜岩内に流入した事は容易に想像し得るであろう。併し貯溜岩の孔隙中に流入した原始石油が下からの大きな排出量に依り更に上方に押し出されて上位の泥岩(帽岩)へ移動したとは考えにくい。これについては前述した三土の論文に紹介された所謂 screening なる現象が貯溜岩と上位の泥岩との間に起つたと解すべきであろう。即ち貯溜岩より上位の泥岩へは水のみが移動し石油は貯溜岩内に残され、之を続ける中に貯溜岩

第1図 母岩の堆積し終った時と母岩が或る程度埋没した時との層厚及び孔隙率の変化

内の石油の濃度乃至飽和率は次第に高くなるという考え方である。

此の場合は石油の物理的性質としては、母岩内の移動に於て考えたような proto-petroleum の状態ではなく、疎水性を持つた、共存水との間に界面張力を生じた現在の石油に近い性質のものと思われる。つまり相対滲透率の作用に依り石油は高孔隙の貯溜岩内は移動し得るがそれより上位の泥岩へは水のみ移動し得たと解釈される。こうした石油の物理性の進化は貯溜岩中か 或いは貯溜岩に流入する少し前に行われたものであろう。

前述した Kidwell に依るヴェネズエラのベダネール沖に於ける現世海底堆積物の研究に依つても砂岩の中の炭化水素濃度は泥岩中のそれよりも遙かに高い事実を認めている。之は screening の可能性を裏付ける証拠の一つともいえよう。

又、若し screening 等に依る石油の濃度の濃縮が行われず、貯溜岩中の石油の飽和率が母岩中に於ける原始石油の濃度と殆ど同じとするならば日本の様な貧弱な拡がりしか持たぬ貯溜岩に於ては到底稼行に足る石油の量は集積し得なかつたであろう。

4. 石油の第一次移動能力

石油の第一次移動を能力（一種のポテンシアル）として之を数量的に把握し、その能力数値と実際の集油の大小を比較する事が本論文の目的である。

これの目的の為に前章で述べたような第一次移動の経過を分析したわけであるが、この移動経過の仮設に従えば、第一次移動能力を数量的に支配する最も大きな要素は次の二つである。

- (1) 母岩から貯溜岩へ流入する流体(原始石油を含む)の移動量。
- (2) 貯溜岩内に於ける石油飽和率(濃度)の濃縮の度合。

上記の二要素を数量的に把握する方法を次に述べる事とする。

A 母岩の埋没圧密と孔隙率減少との関係 第1図に於て右側Bの状態の場合の埋没深度 D_1 が若し母岩の経験した最大の埋没深度であるとすれば第一次移動の量は次の如くなる。

$$v_0 - v_1$$

但し v_0 : Aの状態(埋没前)の母岩の全孔隙容積

v_1 : Bの状態(最大埋没後)の母岩の全孔隙容積

此処で再び繰り返すがAの状態以前、即ち母岩の最上部が沈積し終る迄の母岩下部よりの移動量、云い換えれば海中に逸散しつゝあつた時代の移動量は上記第一次移動量には加えられていないのである。飽くまでAの状態を出発点としてそれ以後の移動量を考えているのである。

全孔隙容積の差 ($v_0 - v_1$) を直接に支配するものは平均孔隙率の差 ($\phi_0 - \phi_1$) である。此処で ϕ_0 はAの状態に於ける母岩の平均孔隙率であり、 ϕ_1 はBの状態に於けるそれである。孔隙率の平均を取つたのは母岩の上部より下部に向つて孔隙率が小さくなつていく為である。

今、 $v_0 - v_1$ を量的に把握する為には $\phi_0 - \phi_1$ と D_1 (最大埋没深度) との関係をも具体的に知る必要がある。つまり母岩の埋没深度と孔隙率減少との函数関係を把握する必要がある。

る。筆者はこれに対する手掛りを試掘井のコアー比重の変化に依り求めてみた。

即ち、秋田県・山形県地方に於てコアー掘した試掘井(余目のみはカツティングに依る)の中で典型的な細粒黒色泥岩(船川層相当)及び暗灰色泥岩(下部天徳寺層相当)と思われるコアーをピックアップし之等の見掛けの比重(孔隙内に地層水が満たされた状態の比重)と埋没深度とをチェックして比較してみた。つまり含水率より孔隙率を計算する方法に似ている。

実際の資料は種平 SK1, 和田 SK1, 北手 SK1, 小屋川 SK1, 院内 R124, 鶴川 SK1, 八竜 SK1, 黒岡 SK1 (以上秋田県) 及び余目 SK1 (山形県) のコアー比重より得た。尚、埋没深度を取る際は当該コアーの採取深度から地表迄を取る事はせず、当該サンプル位置から真の層厚で測つて秋田県では上部天徳寺層上限迄、山形県では観音寺層上限までの層厚を以つて埋没深度とした。以下に述べる埋没深度とはすべてこれと同様の取り方をしている。その理由は上記地層より上位の地層は侵蝕される事甚だしく真に堆積した層厚を捉えにくい事、及び上記地層堆積以後は褶曲等の造構造運動が激しく、事実上埋没に依る圧密作用は終つていてと解釈されるからである。以上に述べた各坑井のコアーの見掛けの比重と埋没深度との関係をグラフにプロットしたのが第2図である。

第2図 秋田県・山形県の試掘井に於ける黒色泥岩コアーの見掛けの比重と埋没深度との関係

第2図に見られるように埋没深度の増加に伴い見掛けの比重も増加している。そしてその増加の仕方は直線的ではなくむしろ指数曲線的である。第2図は埋没深度と見掛けの比重との関係を表わしているが、之から埋没深度と孔隙率との関係を求める為次のような手続きを取つた。

見掛けの比重と孔隙率との間には次の関係式が成り立つ。

$$\rho_a = \frac{(V - V\phi)\rho_R + V\phi\rho_w}{V} \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore \phi = \frac{\rho_R - \rho_a}{\rho_R - \rho_w} \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式に於て

- V : 泥岩の体積
 ρ_a : 見掛けの比重
 ρ_R : 泥岩 (構成鉱物) の実質比重
 ρ_w : 孔隙内の地層水の比重
 ϕ : 孔隙率

(1), (2) 式に於ける ρ_w は実際には塩分 10,000 ppm 乃至 20,000 ppm を含有する地層水の比重で, その数値は 1.007~1.015 程度なので殆ど 1.0 としても良い。そうすると (2) 式は次の如くなる。

$$\phi = \frac{\rho_R - \rho_a}{\rho_R - 1} \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式に於て ϕ と ρ_a とは一次式の関係なので ρ_R の値が与えられれば, ρ_a の値に依つて ϕ の値は一次的に決められる。一方第 2 図は D_1 (埋没深度) と ρ_a との函数曲線なので, ρ_R の値を知れば之は簡単に D_1 と ϕ との函数曲線に置き換える事が出来る。

そこで ρ_R (泥岩の実質比重) を求めると, 筆者の測定した値では, 船川層相当の細粒黒色泥岩の場合見掛けの比重に関係なく殆ど, 2.50 前後を示す。この値は山形県内黒色泥岩サンプルについて石油資源開発 K.K. 酒田試験室が測定したものも略々同じである。

但しこの 2.50 と云う絶対値にはいささか疑問がある。何故ならば, 泥岩の実質比重を得る目的で含有水を除去する為に コアを乾燥する手続きは油層部分のコア分析と同じ方法を用いているからである。

即ち, サンプルを 110°C の温度で 6 時間熟して乾燥したもののについて測定しているのである。所が黒色泥岩の場合, 粘土鉱物を相当量含んでいる事を考えると此の値は粘土鉱物の層間結合水や結晶水を失った後の鉱物比重を測っている恐れがある。併し, ρ_R の値は純粹の鉱物のみでなく孔隙以外のスペースを占めるものすべて, 即ち上記層間結合水や結晶水を含んだもののすべての平均比重であるべきである。

筆者はこういう見地から, 僅か 2~3 個のサンプルではあるが結晶水等を失わない目的でサンプルを軽油に封入してローラーミルに掛けて細粒化した後水を切り (此の水は孔隙中の含水と見做される) 比重ビンを用いて測定した結果, 平均

第 3 図 秋田県・山形県の試掘井にける黒色泥岩コアの孔隙率と埋没深度との関係

値 2.20 を得た。そして此の値を実際の ρ_R の値として (3) 式に代入した。

尚、第2図を見ると判るように、余目 SK 11、北手 SK 1 及び秋田 SK 1 等の見掛けの比重はその他のグループと比較すると同一埋没深度に対して値が大きくなっているが、之等の坑井の堆積盆地上の位置が海底の高まりの上にあつたと推定され純粋の黒色泥岩より実は稍々粗粒なので ρ_R の値が高い為である。実際にこれ等坑井のサンプルで上記と同様の手続きで ρ_R の値をチェックした処 2.23~2.35 の結果を得たので上記坑井の場合は (3) 式の ρ_R に此の値を代入した。

之までに述べたような手続きを経て、(3) 式を用いて第2図の D_1 と ρ_a との関係を D_1 と ϕ との関係に置き換えたのが第3図である。

第3図では埋没深度と孔隙率との関係がプロットされているが、埋没深度の増加に対する孔隙率の減少の仕方は第2図に於けると同様直線的でなく指数曲線的である。これは (3) 式が一次式である以上当然である。又、第2図明瞭に異なるのは、第3図ではプロットされた点があまればらつかず略々同一曲線上にのる事である。これは上に述べた ρ_R の差異から ϕ の値が調整された為で、 ρ_R が多少変化しても D_1 と ϕ との函数関係に殆ど影響を及ぼさない事を意味していると思われる。

第4図 秋田県・山形県の黒色泥岩に於ける埋没深度と孔隙率の一般的関係

第3図にプロットされた点群は上に述べたように同一曲線の近傍に落ちるので之等の中央値を求めて描いた平均値曲線が第4図「秋田県・山形県の黒色泥岩に於ける埋没深度と孔隙率の一般関係」である。同図中に於ける porosity-depth curve がそれである。同カーブが一部破線になっているが、これは此の部分を決する直接の資料はないが、殆ど直線に近い部分なので上方へ直線的に延長した個処である。

第4図の曲線を見ると、埋没深度 600 米位迄は殆ど直線的に孔隙率は減少し 600 米～1200 米の間は曲線を描き 1200 米以上は再び直線的となるが埋没深度の増加に対し孔隙率の減少は極めて鈍感となり、1500 米を越えれば恐らく孔隙率の減少は殆ど見られなくなるのではないと思われる。上記曲線は第3図の説明でも述べたように指数曲線的であるが之は決して新しい発見ではない。

Arthy⁹⁾ が既に泥岩の埋没に依る孔隙率の減少について 数式に依り理論的に推定している。即ち、次の方程式がそれである。

$$p = p_0 \times e^{-bx}$$

上式に於て

P : 現在 (埋没後) の泥岩の孔隙率

P₀ : 沈積当時の泥岩の孔隙率

b : 常数

x : 泥岩の埋没深度

e : 自然対数

第4図の曲線は事実に基づいたものであるが、之が指数曲線に類似していると云う事は Arthy の理論的推定と一致したと云えよう。

又、外国に於ける具体的な事例としては Hedberg¹⁰⁾ がヴェネズエラに於て、Dickinson¹¹⁾ が Gulf Coast の第三系に於て研究して居り、Gussow¹²⁾ が之等をまとめて発表している。之が第5図に於ける Dickinson's porosity-depth curve である。(原著に於ける同図は呎単位であるが便宜上米単位に直した。)

第5図 泥岩に於ける孔隙率と埋没深度との関係
(秋田県・山形県との米国ガルフコーストとの比較)

又、同図には第4図の曲線（黒色泥岩のもの）を投入して Dickinson の曲線との比較をしてある。両者を比較してみると 裏日本の黒色泥岩の方が深い埋没深度まで敏感に減少する事を示している。この曲線の相違は、前に述べた Arthy の方程式に於ける常数 b の相違に依るものと思われる。又 この相違を生じた理由としては 裏日本の黒色泥岩の方が岩質的に Gulf Coast の泥岩より 細粒の為ではないかと想像する。之の裏付けとしては、河合¹³⁾ が関東地方ガス田の坑井に於て上総層群の泥岩の深度と含水率（孔隙率とは一次的な関係を持つ）との関係曲線を紹介しているが、之を見ると裏日本黒色泥岩のものより埋没深度増加に対し 孔隙率減少はずつと鈍感である。そして若し上総層群の曲線を第5図に投入するならば、それはむしろ Dickinson の曲線に近くなるであろう。此処で上総層群の泥岩の方が 黒色泥岩より明らかに粗粒である事実より考えると、一般法則としては泥岩の粒度が大きくなればなる程曲線は水平軸（埋没深度の軸）に対して傾斜角がゆるくなり、砂岩のような粗粒のものになると 傾斜角はゼロとなり埋没の影響を殆ど受けなくなると解釈される。

さて此処で第4図に立ち戻つて、埋没深度と孔隙率との関係を改めて考察する事しよう。

第4図の曲線上の一点は、泥岩（母岩）中の或る一点が或る深度まで埋没した時の孔隙率を示している。例えば泥岩中の或る一点が深度 600 米まで埋没した時の孔隙率は 30% であり、之が 1100 米まで埋没すると 10% に減少する事を示している。逆に埋没深度ゼロ、即ち沈積した許りの海底面に於ける原始孔隙率は 80% であつた事を示している。

以上述べた如く曲線上の一点は泥岩中の或る一点の孔隙率の変化を示すにすぎない。

処が本章に於ける第1図の説明に於て述べた如く、我々が知りたいのは 第一次移動量としての $\phi_0 - \phi_1$ であり、之の為に $\phi_0 - \phi$ である。 ϕ 及び ϕ_0 は各々母岩全体の平均孔隙率であつて母岩中の一部分の孔隙率ではない。これを第4図に依つて説明すると、第1図に於けるAの状態（埋没前）は第4図中のハッチしたAの面積の部分に相当する。又第1図に於けるBの状態（埋没後）は第4図中のハッチしたBの面積の部分に相当する。

具体的には、第4図に於けるAの面積の部分は 母岩が堆積して貯溜岩が沈積する直前に厚さ 580 米になつた事を意味している。此の場合は勿論曲線で見られるように母岩の下部は既に圧密を受けている。（此の状態を仮に埋没前と呼ぶ事は前にも述べた。）

そして、第4図のBの面積の部分は上記の母岩が埋没してその上限の深度 600 米に達した時その下限が 930 米の深度に達して居り層厚としてはAに於ける 580 米が圧密に依り 330 米に減じた事を意味している。

此処に於て我々が知りたいのは第4図Aの部分の平均孔隙率 ϕ_0 であり、Bの部分の平均孔隙率 ϕ_1 である。之等は第4図に於てはA乃至はBの部分の porosity-depth 曲線の積分平均値として与えられる。幾何学的な表現をすれば、A若しくはBの部分の面積をそれぞれ二等分する点の孔隙率が ϕ_0 又は ϕ_1 の値である。

そこで次に上記の ϕ_0 及び ϕ_1 を具体的に計算して求める方法を述べる事とする。現実の母岩について ϕ_0 及び ϕ_1 を第4図より求めるに当つてはAの部分（埋没前）の層厚 d_0 、Bの部分（埋没後）の層厚 d_1 及びBの状態に於ける最大埋没深度 D_1 を知る必要がある。之等三要素を知れば第4図の図上で平均孔隙率 ϕ_0 及び ϕ_1 を求める事が出来る。

先づ d_1 は現実の場合地下に於て現在見られる母岩の層厚とすれば 坑井柱状図や地質断面図等の資料から容易に求められる。又 D_1 についても地下に於ける母岩の上限より或る特定の地層までの層厚を最大埋没深度として取れば之も前記資料から容易に求められる。

以上の求めた D_1 及び d_1 を第4図の水平軸 (埋没深度の軸) の上にプロットすれば Bの部分の占める位置及び面積は決まる。これさえ決まれば幾何学的に Bの面積の二等分点を求めて ϕ_1 の値が得られる。

所が ϕ_0 については簡単に第4図上のみでは求める事は出来ない。何故ならば d_0 (埋没前の母岩の層厚) を直接知る資料は無いからである。そこで ϕ_0 を求めるには d_1 及び ϕ_1 を用いて次のような方程式の計算方法に依つた。

母岩の実質体積 (孔隙以外の容積) は埋没の以前と以後において、いい換えれば圧密の前後に於て変化せず等しいと見做すならば次の関係式が成り立つ。

$$d_0(1-\phi_0) = d_1(1-\phi_1) \dots \dots \dots (1)$$

又第4図のAの部分に於て層厚 (d_0) が 600 米以下の場合は porosity-depth 曲線は殆ど直線となり、 d_0 と ϕ_0 との関係は一次的な函数関係と見做しても大きな誤りはないと思われる。又、現実問題として d_0 が 600 米を越える場合は稀なので殆どこの直線部分を取り扱う事が多い。此の直線部分の Tangent を第4図より読むと 近似的には次の一次式が成立する。

$$\frac{d_0}{0.8-\phi_0} = 2400 \dots \dots \dots (2)$$

(1) 及び (2) 式より d_0 を消去すると次の二次式を得る。

$$\phi_0^2 - 1.8\phi_0 + 0.8 = \frac{d_1(1-\phi_1)}{2400} \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式に於て d_1 及び ϕ_1 の値を知れば ϕ_0 の値が得られるが、 d_1 及び ϕ_1 は前に述べた手続きに依り、既知の値であるから之等を (3) 式に代入して方程式の解即ち ϕ_0 の値が得られる。(3) 式は二次方程式であるから ϕ_0 の値は二通り得られるが $\phi_0 > \phi_1$ なる条件により片方を捨てる事が出来る。

以上の方法に依り現実には ϕ_0 及び ϕ_1 の数値は求められ、 $\phi_0 - \phi_1$ の値は知り得るが、当初の目的である第一次移動量 $\phi_0 - \phi_1$ は未だ得られていない。併し第一次移動能力を計算するには $\phi_0 - \phi_1$ の値は直接必要とせず、むしろ $\phi_0 - \phi_1$ の値の方が必要なのである。これについては次項Bに於て述べる。

B 第一次移動能力の方程式 (PM 方程式) 此処では 前項Aの第一次移動量の問題に加えて、貯溜岩内に於ける石油飽和率 (濃度) の濃縮の度合を考察したい。

第3章で述べた如く貯溜岩とその上位の泥岩との間に screening なる現象が起るとすれば、一定の貯溜岩孔隙容積に流入する絶対量、即ち第一次移動量 $\phi_0 - \phi_1$ が大きくなればなる程濃縮される度合も大きくなる。此の場合は 勿論第一次移動中の母岩に於ける石油濃度は一定であると云う仮設の上に立っている。

又、一方若し第一次移動量 $\phi_0 - \phi_1$ が一定であるとしたら、之を受け入れる貯溜岩の孔隙容積としてはむしろ小さい程濃縮の度合は良くなるわけである。

以上の事を別の表現をすれば、濃縮の度合は貯溜岩の単位孔隙容積中に流入する第一

次移動量に依ると云う事が出来る。

今、此の濃縮の度合を第一次移動能力 (PM-potential of migration) と名付けるならばそれは次の式で表現される。

$$PM = \frac{\psi_0 - \psi_1}{\psi_R} \dots\dots\dots (1)$$

上式に於て $\psi_0 - \psi_1$ は今迄説明した通り第一次移動量であり、 ψ_R は $\psi_0 - \psi_1$ なる量の移動する直上の部分の貯溜岩の全孔隙容積である。此処で「孔隙率」の定義から次の関係式が成立する。

$$\psi_0 = V_0 \phi_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\psi_1 = V_1 \phi_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\psi_R = V_R \phi_R \dots\dots\dots (4)$$

上式に於て

V_0 : 埋没前の母岩の全体積

ϕ_0 : 埋没前の母岩の平均孔隙率 (前項 A に既出)

V_1 : 埋没後の母岩の全体積

ϕ_1 : 埋没後の母岩の平均孔隙率 (前項 1 に既出)

V_R : 貯溜岩の全体積

ϕ_R : 貯溜岩の孔隙率

之等 (2), (3) 及び (4) 式を (1) 式に代入すれば次の如くなる。

$$PM = \frac{\psi_0 - \psi_1}{\psi_R} = \frac{V_0 \phi_0 - V_1 \phi_1}{V_R \phi_R} \dots\dots\dots (5)$$

更に、母岩の圧寄の前後に於て泥岩の実質体積には変化がなく等しいと見做されるので次の式が成立する。

$$V_0 - \psi_0 = V_1 - \psi_1 \dots\dots\dots (6)$$

(5) 式及び (6) 式より V_0 を消去すれば次の如くなる。

$$PM = -\frac{V_1}{V_R \phi_R} \left(\frac{\phi_0 - \phi_1}{1 - \phi_0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

この (7) 式を仮に PM 方程式 と呼ぶ事とする。

若し母岩及び貯溜岩の層厚が横にあまり変化せず或る程度の歪りを持つ場合は (7) 式に於ける V_1/V_R は両者の層厚比 d_1/d_R に置き換える事が出来る。従つて (7) 式は次の式に置き換えられる。

$$PM = -\frac{d_1}{d_R \phi_R} \left(\frac{\phi_0 - \phi_1}{1 - \phi_0} \right) \dots\dots\dots (8)$$

上記 (7), (8) 式に於ける PM は一種の第一次移動能力指数と考えるが、次章 5 に於ては現実の坑井資料より (7), (8) 式の右辺の各要素を算出して PM の値を求める方法を述べ、第 6 章に於ては各地域の PM の値の実例について述べたい。 (未完)