動力学的考察による継変作用と石油移動*

鍋 谷 祐 夫**

(昭和51年 8 月 9 日受理)

Diagenetic and Migrational Dynamics with regard to Hydrocarbon Reservoirs

By

Sachio NABETANI

Abstract A significant quantity of hydrocarboneous fluid is produced at a critical depth in sedimentary basin by the dehydration of clay minerals under the diagenetic conditions of overburden pressure and heat. The dissociated liquid accompanied with the formation water primarily causes an abnormally high pressure zone at the stratum. If any exceptional force does not occasionally act on for basin, the fluid may be stationally pressed out into a porous medium and driven to final reservoir for a considerably long period of several million years. The driving force of migration is however not only the hydro- and lithostatic pressure, but also a tectonic stress. Regarding to a younger oil basin in the tertiary orogenetic system, the emulsive hydrocarbons are not ready to be held in the primary formations, but run off to more stable and porous reservoirs through a large number of cracks and fractures developed temporarily within the basin by means of destructive stresses of earthquakes or volcanism. Numerous seismic and volcanic activities which magnitudes are generally small and occasionally large, are relevantly connected to the oil tertiary evolution in this country. The diffusive periods and ranges are estimated to be comparable to the order of the build-up times and the dimensions of the events. The migration of hydrocarbon is thus so frequently synchronized to the dynamic activities of the basin that accomplished more rapidly on a farther scale than estimated with static permeation of the fluid.

序

石油根源岩と貯留岩の間の化学的、空間的、時間的な遷移過程の解明は石油地質学、探鉱技術の発展の上で最も重要な課題の 1 つであるから、大まかに展望してもここ 10 年近くの進歩は内外ともに著しい。なかんずく移動集積機構の中で果す媒質流体の生成と異常高圧層 (abnormal high pressure zone) の役割の評価なくして冒頭プロセスを理解することが困難というのが現状である。逆にこの問題から石油・ガスの根源成因の諸問題の発展も刺激すること大きく (田口, 1975), 1 つの大きな石油地質の流れの key ともいえるであろう。

アメリカ大陸油田における gypsum → anhydrite に関する例 (BREDHOEFT and HANSHAW, 1968) もあるが、

一般にわが国のように粘土鉱物を中心とする地層における炭化水素の胚胎が圧倒的に高い地域では、粘土鉱物が果す根源および排出母体として役割は大きく、堆積盆の圧密という力学過程において地層の継変 (続成, diagenesis)こそが油田形成の主導者であるということを認めないわけにはいかない。この意味で montmorillonite → illite 変質というプロセスの数理を示した POWERS (1967) の業績は卓抜で、この後の研究や調査に方向を指示したのであった。同様な手法をもって第三紀火山活動を無視することのできないわが国の油田においては、凝灰岩シリーズ (vitric tuff → clinoptilolite → analcime → albite) に関する継変過程が藤岡ら (1969, 1971) によって実証され、かくして石油母岩の種別を越えた広くまた永年の現象として低変成は空間的、時間的座標であることは明瞭となった。

したがって石油成因と貯留の両極端はこの座標の始端

* 昭和51年 5 月 27 日, 第 41 回石油技術協会総会地質・探鉱シンポジウム講演

** 弘前大学理学部地球科学科

と終端に置かれるべきものではなく、任意の点に位置させねばならないのであって、かつ動きつづけていると理解されねばならない。

このように問題を展望した時、未だ議論の進展途上とはいえ、問題の動力学的解明が欠除していることが感じられる。すなわち流体が炭化水素を胚胎するに到る上記過程はミクロなものであり熱力学過程であって、多少の移動集積が存在してもきわめて局所的なものである。しかしそれが貯留に続くにはかなり大規模な力学過程がなければならない。この意味で前者を1次、後者を2次移動として局所および地域的な「別個」の要因からも区分し、主として時間的な過程で認識されているものに物理的な区別をも明確に組入たいと考える。さてこの2次移動集積の研究は命題としたところの動力学的取扱がほとんどなされていないのであって、いわば静的な議論である。石油の移動集積が見掛け上静的であるほどの短い時間であればその力作用に、また長い時間ならばその間の堆積盆の進化中に、また貯留層が形成されていればその安定と破壊の運動に、いたるところで考慮に入れなくてはならないのが動力学的過程であろう。今日、この過程の考察が不足であるのは隠しきれないのであるが、今後の研究の進展によっては、移動集積（および継変作用そのもの）が単に堆積学的、化学的過程に留らず global tectonics の断面としても把握されるであろうし、それが探鉱技術の進歩に果す役割はきわめて大きなものになるであろうと推測するのである。ここで移動集積の力学的過程に関して2、3試論を提示したいと考える。

圧密継変機構

堆積盆の形成の始まりから終りまでの間の圧密は継変のみならず移動集積問題の出発点であるから、多くの議論もありこのシンポジウムでも報告されているので大方は割愛する。

筆者らは堆積速度と異常高圧層形成速度から圧力保持が可能な地層モデルを論じたが（鍋谷、藤岡、1973）、そのような層間水排出でなくとも自由間隙水が地層水を形成し閉込められて行く過程や条件についても、総合的に考察されねばならないし、圧密方程式の同じ枠の中で比較的簡単に取扱えるものである。このような議論は油層工学のみならず水理水文学上の重要な問題（柴崎編、1976）とも共通していて、流体収支すなわち storage と runoff, recharge と yield の収支算定が地層の圧密との関係においてなされねばならない。

わが国の地殻現象の1次相関範囲を150km程度とすれば、1堆積盆も比例して小さく見積られる。ディメンジョンに比例して深度も地質時間も小さい。しかるにカナ

ダのアルバータ油田地域では、上部デボン海における migration range は1,000kmといっても過言ではない。B. HITCHON (1969) はこの盆地における石油鉱床形成とともに地下水流動についても論じている。

次に透水層ないし貯留層と不透水層ないし根源岩との関係、すなわち孔隙率と浸透率の不均等性が流体も含めた圧密過程でいかに扱われねばならないかが問題である。異常高圧層問題でも明かなように、経過する地質時間に対してこれらの層厚（浸透率も含めて）はフーリエ数やシャウウッド数を1つの基準としてクリティカルなものであろうから、単に泥岩とか砂岩がどの程度あるからということだけから論じることはできない。石油集積の条件は堆積盆の規模、層の浸透率と累層または複境界条件、時間、有機物質量ないしは初期条件を1つのスケールファクターをもって考察しなければならない。この意味において、規模の小さい堆積盆ほど悲観的であって、そこでは石油ガス貯留の多寡というよりは完全に有無の判定をもって評価されることになる。

さて地層における流体移動の評価に際して、筆者は孔隙率よりも浸透率を使用しなければならないと考える。孔隙率が使われなければならないのは、地震探鉱その他の物理探鉱解析や物理検層解析のように流体の量比のみが問題でその流動が問われない場合である。流体の特性が動力学的条件のもとで固体の特性とともに考慮されねばならない堆積盆の圧密過程においては、あくまでも浸透率を軸に議論されなければならない。

最密空間群パッキング（松本、1969）を考える時、球では面心立方（ $O_h^h - Fm3m$ ）と六方（ $D_{6h}^4 - P63/mmc$ ）空間群であるが、扁平楕円体に圧密されたとしても（例えば、それぞれ $D_{3d}^4 - R3m$, $D_{2h}^{12} - Cmc$ ）密度は $\pi/3\sqrt{2} = 0.7404$ すなわち孔隙率は25.96%で変化はないが、比表面の増大によって浸透率が減少することは明らかである。しかしこのような圧密変形を考えることは堆積岩の続成領域においては注意を要することで、今ヘルツの固体接触問題を等半径（ R ）、等弾性（ヤング率 E ポアソン比 σ ）の2球について考え、圧力（ F ）と1軸圧縮量（ h ）を見るに

$$h = (2D^2/R)^{1/3} F^{2/3} \quad (1)$$

ただし

$$D = \frac{3}{2} \left(\frac{1-\sigma}{E} \right)$$

は半径1mmの石英として

$$h \doteq (3 \times 10^{-8}) F^{2/3}$$

であるから、埋没深度1kmで球であるものの2kmにおける圧縮比（ h/R ）は 5×10^{-7} である。しかるに粒径が小さくなるに従ってそれは飛躍的に増大し、100 μ で5×

10^{-5} , 10μ で 2×10^{-4} , 1μ では 5×10^{-3} にも達する。したがって構造粒子がある契機によって分断されるような破壊条件に会えば、より安定な（細粒化）方向に、同時に大きな粒子間隙を小粒子が埋めて行くというメカニズムによって地層の圧密が進行する。

地殻構成岩石の巨視的な破壊歪は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ であるから、そのような歪に耐え得ない領域を叙上の議論を適用して仮に 10μ 以下の粒子としよう。泥岩層の粒度構成を平均 1μ とすると圧縮量は $50\text{\AA}$ であり、この圧縮量が最も弱い結合水の dehydration に使われる（この論文の主要命題は継変作用による dehydration なので）と考えるのが自然であるから、粘土鉱物の結晶水を $2.5\text{\AA}$ とし、（POWERS, 1970）20層分の水分子を解放することとなる。KELLER(1970)が紹介しているJOHNSの研究(1963)によれば、モンモリロナイトのクロライト化は $2 \sim 1\mu$ 以下の細片で圧倒的に多い。このことはイライト転移と併せて上のメカニズムの仮説に有利である。このようなプロセスを継変領域のどこに考えてよいかということは埋没深度（圧力と温度）の静熱力学の問題であるとともに、その堆積盆の歴史（時間—動力学）の問題でもある。

一般に温度条件が調べば圧力（深さ）は低次の条件であって、この意味でどのような深度であるか幅を持って考えたい。地温勾配を念頭においた時、温度条件も圧力条件も日本では $1,000\text{m}$ 以深で調うに違いない。したがって実例も多いし、深度もまちまちではあるが、孔隙率が飛躍的に低下する深度（例えば八橋油田、女川層、 $1,450\text{m}$ ）を継変深度としても異議はなかろう。

従来、粘土鉱物の継変に関して圧密と地温の役割の違いが混同されているが、以上の議論から簡潔な表現をもってすれば“堆積盆が圧密沈下によって地温条件に達した時に解離された層間水は、炭化水素の搬送者として動力学条件下に形成された組織を通して貯留層に達する”のである。

堆積盆の進化過程において、初期段階もしくは浅部において粒子の集合と水の押し出しが進み地層は初期的形体を調べて行き、第2段階もしくは漸深部においては貯留層の安定化が進むとともに泥質岩になおも圧密が続く、最終段階もしくは深部においては破壊と再組織が始まり、地温の上昇は広く継変作用を進展せしめ、熟成の域に達した石油は高压自由水によって遠隔の貯留域に向かって移動集積され始めるのである。

石油の集積機構

堆積盆の動力学的過程を論じることがきわめて難しい。前節の圧密過程はその定義からはむしろ静力学的と

いってもよい。動力学的課題はその設定から解に至るまで条件が多様に変化すると考えねばならない。ここでは従来ほとんど取扱われていない問題ないしはそれを石油地質学の立場から見てどの程度まで解決して行かなければならないか、というようなことを考えてみたい。

温度圧力条件が調っても石油集積の経路がなければ鉱床を形成しない。この経路に関してはそれが初生的な流動通路である場合もあろうし、後生的な間隙による場合もあろうが、一般にイメージとして持たれるのは砂の脈絡が褶曲や断層運動に伴う破碎構造であろう。前者は堆積の、後者は構造地質の問題であって、ここではそのような常識的な移動経路は除外して考えることにしたい。また真柄（1969）は異常高压層から流体の上方および下方への移動を論じているが、そのような static な問題もここでは除外したい。

岩石中には無数の空隙が存在しているが、極小は結晶の間隙から大は裂罅断裂に至るまで多様である。間隙は一般にきわめて扁平で厚さ対拡がりは 10^{-1} 以上と 10^{-3} 以下の群に分かれているなど段階的の分布になっていて、厚さ 0.01μ 、拡がり 10μ 程度が卓越的なものと考えられる（HOENING, 1976）。拡がりは岩石の表面張力に比例し応力の自乗に逆比例するから、埋没深度や構造歪力に支配される。いいかえれば、無制限なディメンションは持ち得ないで釣合を保つ。たとえばヤング率 (E) 5×10^{11} 、ポアソン比 (σ) 0.25 、表面張力 (T) を 10^3 と仮定すれば、亀裂の限界長さ (L) と応力 (S) の関係は GRIFFITH によって

$$LS^2 = \frac{2TE}{\pi(1-\sigma^2)} \doteq 3 \times 10^{14} \quad (2)$$

と与えられるから（ランダウ、リフシッツ、1974） L は S が 550bar の時に 10μ 位になる。堆積層せん断破壊強度を数 100bar にとって差支えなく、それ以下では破壊や亀裂を考えないことにしてよい。ところが表面張力はミクロからマクロの物体に対象を移すに従って極端に変化して行き、断層長 $1,000\text{km}$ の地震領域では 3×10^{10} に達する（竹内均、1974）。ミクロにもマクロにもこの式を使うことにして、今一方的に応力が増大して行く場合、地層の破壊強度条件に達すると小さな亀裂が無数にでき始める。このため地層は全体として膨張し始める。やがて亀裂は周辺の流体によって充され始めるのでその領域への移動が生じるが、さらに応力の増加は空隙長を増大させると同時に流体を排除しながら空隙を閉塞することとなる。この期間は非常に短かく今や臨界歪以上に達している歪エネルギーはここで一度に解放され、断層はそれまでの亀裂分布で最も断裂の方向に生ずる、というのがショルツ理論(SCHOLZ ほか、1973)とかダイラタンシー

説といわれる地震発生過程であり、『pre-dilant→dilant→inclusion→closure→growth』の各相(BRADY, 1974—76) (Inclusion Collapse Theory)』の概要である。

このように岩石中のマイクロクラックの生成—消滅, または発展(断層)の過程に関する地殻力学の問題は当面する石油地質学における流体移動の課題にとって特に興味深く, 共通する領域である。前節において考察したように熟成された炭化水素を伴う流体は多種多様な経路から貯留層に導かれねばならないが, 初生的な流動通路のみでは説明はできない。特に堆積盆深部からのプレスアウトはもはや圧密領域ないしは低度継変領域での考え方では解決できない。

高圧層拡散

鍋谷・藤岡(1973)の与えた目安は継変過程において異常高圧層が形成され維持されるための条件時間であり, ボアソン形式を伴う流体拡散(第3式参照)であった。堆積盆進化速度のもとで, 通常の動粘性係数と浸透係数では長時間の高圧保持はほとんど不可能であり, もしこのような過程のみが堆積盆環境なら石油集積は重力分離以外にないことになる。しかし種々の規模の crack が堆積盆の変動の歴史の中で発生し消滅する事実を考えれば, 石油の集積に果す crack の役割は圧倒的に確率の高いものとみられる。したがってこの場合には地層それ自体の浸透率の大小, 位置(深度), 層厚, 貯留構造への指向性といった従来の理論では決定的だったファクターはその重要度を大幅に失うことになる。それに代って堆積盆における応力の種類, 分布, 時間的変遷, 地層の歪物性が問題に主導的な役割を果たすようになる。また鉱床形成論そのものも, 現時点において好ましい堆積構造の条件にあるということではなく, 堆積盆の歴史においてそれに加えられた応力の種類, 規模, 時間などと炭化水素ポテンシャルの関係で見直されねばならないであろう。

さて, 状態 U の拡散は放物型運動方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \nabla^2 U + A \quad (3)$$

で表わされる。ここに D は拡散係数, $D \nabla^2 U$ は拡散束, したがって第1項は拡散速度, 第2項 A は湧出速度である。

状態 U は圧密量, 温度, 水頭, 流量, 濃度などに共通な形式である一方, 粒子数とか個数の分布でもある。したがって冒頭の crack 数, 規模, エネルギー, 歪などでもある。元来 U はポテンシャルであり, 前記炭化水素含有量とか potentiality など同一形式で扱える。

今孔隙率 $\phi=0.1$, 浸透係数 $k=0.5 \text{ md}=5 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$

なる地層に対する粘性係数 $\mu=10^{-2} \text{ poise}(=\text{dynsec}/\text{cm}^2)$ 圧縮率 $\beta=5 \times 10^{-5}/\text{bar}=5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{dyn}$ の流体の拡散係数は仮に (k, ϕ の関係で非現実的だが)

$$D=k\phi/\mu\beta \quad (4)$$

なる式を使えば $1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。拡散方程式は初期状態 U_0 によって面積 A に対し

$$U=U_0 e^{-D t / A} \quad (5)$$

であるから, 状態が $1/e$ になる時間を拡散時定数とすれば, 今 100 km^2 の堆積盆では 10^{12} 秒 ≈ 3 万年と算定される。また 10^4 km^2 の安定な中・新生代堆積盆を考えれば $D \approx 0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であるから, 浸透係数も孔隙率も1桁以上は小さくないといけない。ところが今 $D=10^4$ とすれば上のような堆積盆ではそれぞれ3年および3万年で拡散してしまう。力武の球モデルによってさらに正確な状態式(圧力 P , 球半径 r , 平衡値/初期値)

$$\frac{P}{P_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{s^2} \exp\left(-Ds^2\pi^2 \frac{t}{r^2}\right) \quad (6)$$

によって体積算定すれば, 球半径 5 km で125日, 50 km で32.3年となる。

前述のダイラタンシー理論は近年の地震学上のデータからきわめて多方面から実証されていて, diffusivity は $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度でなければならない。故にそのためには式(4)によって ϕ の増大は期待できないから k は100md以上に増大する。これは地域の平均値であるからかなり有望な浸透率であって砂層空隙に換算して数10 μ となろう。半径5kmの球領域が上記のように破壊を生じた場合の地震のマグニチュードは5.3である。50kmでは8.2となる。この場合の拡散時定数がいわゆる先駆現象継続時間で, 震央領域では湧水や地下水位の上昇現象が見られる。しかしこのような破壊は変動帯であれば少なくとも地質時間を通して非常に数多く生じてきたであろうし, また大規模な破壊には到達しなかったが, 盆内部に断層系の発生消滅のみに終わった時ももっと頻りにあったものと推測される。

現在の地殻破壊運動に関して大局的な原因を海洋地殻プレートの沈みこみとして, それによる地震ビルドアップ時間

$$T_c = \frac{2\eta_a A_c}{d_a d_s E_s} \quad (8)$$

が拡散係数 $D=0.25A/T$ として見積られる(BRADY, 1976)。同様の推算を日本海側の高温地殻と堆積基盤の間に考えると, 地殻下(深発地層面までとする) $d_a=50 \text{ km}$ の粘性が1桁低く $\eta_a=10^{21}$ とし, 厚さ $d_s=20 \text{ km}$ の地殻 ($E_s=5 \times 10^{11} \text{ dyn}/\text{cm}^2$) におけるビルドアップ時間は A_c を km^2 単位で表わして

$$T_c = 0.13 A_c \text{ (year)} \quad (9)$$

だから $1,000 \text{ km}^2$ の堆積盆で130年となる。この程度の破

壊面積（地震マグニチュードにして6.7）は裏日本では理由あるもので不思議はなく、ビルドアップ時間も大体この程度である。力の拡散係数は太平洋側よりもっと小さいとも考えられるので時間もさらに長くなるだろう。

現在の地殻活動は鮮新世から引続く本邦島弧変動と見る立場から、すでに完結した含油第三系堆積盆では浅部から深部に至るまで上記のようなかなりの頻繁さをもって構造進化を経てきており、グリンタフ基盤からさえも容易に浅部に向っての導路の生成消滅を繰り返してきたものと考えられる。このような堆積盆における炭化水素の移動集積は、臨界歪到達時期には先述のような開口による非常に大きな浸透率を加えて、高压流体と大きな絞出し応力によって比較的短時間のうちに実現されるわけで、圧密のみによる静力学的過程では考えられないことである。

したがってこのような地殻活動による要因を認めるならば、地層の常態における浸透性をあまり考慮する必要はない。油田の規模は堆積盆の規模によって決まる。

クラックは泥質相において異常に発達するから炭化水素の絞出し効果は高く、相境界において停止するから初生的間隙（貯留砂など）は良好な集油層となりうる反面、それより浅層にもし泥相があっても、低継変層で塑性が大きければ歪が大きくても開口部は急速に回復されよう。これは流体の逸出を抑止するし、また仮に上部に破壊が生じて、この時点における油層圧はすでに静水圧に近づいているから問題はなく、変動時間が過ぎた後に来る再度の圧密により開口部はすべて閉塞され、次の recharge に向う。

歪の伝播と異常高压流体の輸送は多様な堆積岩相において高孔隙相を緩障または流通経路としているのであって、この観点から今後より動力学的な石油集移過程の研究の発展が期待される。

参 考 文 献

- BRADY, B.T. (1974): Theory of earthquakes, I, *Pur. Appl. Geoph.*, vol. 112, pp. 701-725.
- (1975): Theory of earthquakes, II, *Pur. Appl. Geoph.*, vol. 113, pp. 149-168.
- (1976): Theory of earthquakes, III, *Pur. Appl. Geoph.*, vol. 114, pp. 119-139.
- BREDHOEFT, J.D. and HANSHW, B.B. (1968): On the maintenance of anomalous fluid pressures, I. Thick sedimentary sequences, *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 79, pp. 1097-1106.
- 藤岡一男・吉川輝四(1969): 秋田油田における凝灰岩の沸石化について, 石技誌, 34巻, 145—154頁
- ・———(1969): 同上, その2, 石技誌, 34巻, 691頁
- ・佐々木詔雄(1971): 同上, その3, 石技誌, 36巻, 127—135頁
- 藤田至則(1972): 日本列島における新生代の変動, 科学, 42巻, 212—220頁
- HITCHON, B. (1969): Fluid flow in the western Canada sedimentary basin, 1 & 2, *Water Resources Res.*, vol. 5, nos. 1 & 2.
- HOENING, A. (1976): Workshop on cracks in rocks *EOS*, vol. 57, pp. 9-12.
- JOHNS, W.D. (1963): Verteilung von Chlor in rezenten marinen und nichtmarinen Sedimenten, *Fortschr. Geol. Rheinld u. Westf.*, vol. 10, pp. 215-230.
- KELLER, W. D. (1970): Environmental aspects of clay minerals, *Journ. Sed. Petrol.*, vol. 40, pp. 788-813.
- ランダウ・リフシッツ: 弾性理論, 東京図書(1974)
- 真柄欽次(1969): 頁岩の孔隙率—浸透率関係について, 石技誌, 34巻, 1—7頁
- 松本崑生(1969): 楕円体の最密空間群パッキングについて, 鉱物学雑誌, 9巻, 273—293頁
- 鍋谷祐夫・藤岡一男(1973): 秋田油田における異常高压層の発達, 石技誌, 38巻, 79—86頁
- POWERS, M. C. (1967): Fluid release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration, *A.A.P.G. Bull.*, vol. 51, pp. 1240-1254.
- RIKITAKE, T. (1975): Dilatancy model and empirical formulas for an earthquake area, *Pur. Appl. Geoph.*, vol. 113, pp. 141-147.
- SCHOLZ, C.H., SYKES, L. R., and AGGARMAL, Y.P. (1973): The physical basis for earthquakes prediction, *Science*.
- 柴崎達雄編(1976): 地下水盆の管理, 東海大学出版会
- 田口一雄(1975): 最近の石油成因説——続成作用後期成因説の再抬頭一, 石技誌, 40巻, 8—23頁
- 竹内均(1974): 地球物質および構造材料の表面強力, 地震, 27巻, 262—363頁