上方移動と下方移動に関する考察(1)

眞柄 欽 次*

(昭和 43 年 3 月 15 日受理)

Considerations of Upward and Downward Migrations of Fluids (Part 1)

By

Kinji MAGARA

Abstract Considerations of upward and downward migrations of fluid in the subsurface are discussed in this paper. When shales are deposited and compacted, most compaction current expelled from them seems to go upward, because the shallower the depth, the more porous or permeable are the shales in the normal condition. However, if a permeable sandstone reservoir exists below the shales, some amount of the downward compaction current from the closest parts of shales to the permeable sandstone would occur. Although the amount of the downward compaction current in this case is relatively small, it could be more important than the upward because its efficiency for the formation of hydrocarbon accumulation seems to be larger.

The thicknesses of the upward and downward fluid movement zones in this simple situation are related to the minimum permeabilities in both zones, and can be determined by using Athy's porosity—depth curve as the standard relation under compaction equilibrium condition, and Kozeny's and Archie's functions relating porosity to permeability.

1. 緒 言

検層データによって地下の流体圧を推定する新しい方法が⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、ここ数年来開発され、著しい発展をとげているが、この方法は泥質岩の圧緊機構と流体圧との間の関係についての、多くの事実をわれわれに示しているばかりでなく、炭化水素の移動・集積に関する新しいいくつかの考え方を提示しているものと思われる。筆者は前論文⁽⁸⁾において、Sonic log より求められた泥岩孔隙率の垂直分布から、長岡平野における上方移動と下方移動の境界面を決定するとともに、下方への圧緊水流量を推定した。長岡平野でみられる現象は、いわゆる未圧緊 (under-compacted) 頁岩、または泥岩の分布地域に共通して存在する現象であると思われる。すなわち、比較的若い堆積盆地内で、静水圧的な平衡を保持しえな

いくらい速く、大きな厚さの粘土層が広範囲に堆積している地域には、ある程度共通して、この現象が存在しているものと考えられる。

本文において筆者は、堆積速度の比較的速い模式的な頁岩—砂岩堆積地域において、砂岩を流体の排出口と考えた場合における、流体の頁岩内での上方移動と下方移動について論じた。この模式例における頁岩の圧緊平衡状態での孔隙率—深度関係として、古生層の頁岩資料にもとづく Athy の孔隙率—深度曲線を使い、孔隙率と浸透率の関係については、Kozeny と Archie による関係を用いた。頁岩中の流体の上方移動と下方移動の境界面の深度は、頁岩の堆積と圧緊の段階により上下に変化し、それぞれの圧緊水流量も各段階により変化するものと思われる。

下方への圧緊水流量は、上方へのそれに比べて非常に少ない。しかし下方移動をもたらした頁岩は、下位の貯留岩に対する帽岩としての役目をはたしているため、下方移動が石油の集積に与える効果は、より大きなもので

* 石油開発公団事業本部
カナダ留学中 (Institute of Sedimentary and Petroleum
Geology, Calgary, Alberta)

あると考えられる。したがって、本文では下方移動について、とくに詳しく論じた。

2. 頁岩孔隙率と地下流体圧

Sonic log や Induction log を使った地下流体圧の推定法については、すでに参考文献⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾において詳しく紹介された。この方法は、各種の検層を使って頁岩孔隙率の変化をとらえ、それによって地下の流体圧を推定しようとするものである。すなわち、純粋な頁岩中で記録された音波走行時間のよみ Δt_{sh} は、ほぼ頁岩孔隙率に比例するものと思われ、また頁岩の比抵抗 R_{sh} または Conductivity と孔隙率との間にも、地層水の比抵抗に関する考慮を加えれば、比較的単純な関係が存在するものと思われるので、これらを使って頁岩孔隙率の変化を知ることができる。第1図はその1例である。地表から深度 11,000 ft 付近までの範囲には静水圧環境が存在し、この部分では R_{sh} と Δt_{sh} が一様に変化している。これは頁岩孔隙率が比較的一様に変化していることを暗示しているものと思われる。一方、約 11,000 ft 以深で

は流体圧が異常になるとともに、 R_{sh} と Δt_{sh} の値が静水圧部分に現われている傾向からはずれている。すなわち、この部分では Δt_{sh} が大きな値の方へずれ、 R_{sh} が小さな値の方へずれているが、これは異常高圧部分では頁岩孔隙率が異常に高いことを暗示しているものと考えられる。このようないくつかの例については、すでに参考文献(9)の第2図、第4図、第5図、参考文献(10)の第1図、第2図、第3図および参考文献(11)の第2図、第3図などで紹介されているので参照されたい。

第2図は横軸に対数スケールで頁岩孔隙率を、縦軸に真数スケールで深度をとって、プロットした頁岩孔隙率垂直分布の模式例である。図中の上部には静水圧環境が存在し、下部には異常高圧が存在する。静水圧部分では、頁岩孔隙率と深度との間に指数関数が存在すると考えられ、第2図のような片対数グラフ上では直線に近い形が描かれるが、異常高圧部分ではこの直線よりも孔隙率の大きな方へずれる。いま、流体圧を求めようとする異常高圧部分の深度を Z 、この深度の頁岩孔隙率と等しい孔隙率を有する静水圧部分の頁岩の深度を Z_e とする

第1図 深度対頁岩比抵抗 R_{sh} 、音波走行時間 Δt_{sh} 、流体圧勾配の例
[Rogers, L.C.,⁽⁶⁾(1966) より]

第2図 頁岩孔隙率垂直分布の模式例

と、深度 Z における異常高流体圧 p は参考文献 (11) で述べたごとく、次式により与えられる。

$$p = \rho_w \cdot g \cdot Z_e + \bar{\rho}_{bw} \cdot g \cdot (Z - Z_e) \quad (1)$$

ここで ρ_w は地層水の密度、 $\bar{\rho}_{bw}$ は地層の平均密度、ならびに g は重力加速度である。(1) 式によると深度 Z における流体圧 p は (深度 Z_e における静水圧) +

(深度 $Z \sim Z_e$ 間の岩圧) によって与えられることがわかる。

深度 Z における異常高流体圧 p は2つの成分、すなわち静水圧成分 p_n と過剰圧成分 p_a とに、便宜上分けることができる。よって

$$p = p_n + p_a \quad (2)$$

この場合の p_n は次のように表わすことができる。

$$p_n = \rho_w \cdot g \cdot Z \quad (3)$$

ゆえに (1), (2), (3) より、過剰圧成分 p_a は

$$\begin{aligned} p_a &= p - p_n = \rho_w \cdot g \cdot Z_e + \bar{\rho}_{bw} \cdot g \cdot (Z - Z_e) - \rho_w \cdot g \cdot Z \\ &= (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) (Z - Z_e) \cdot g \end{aligned} \quad (4)$$

と表わされる。ここで $Z - Z_e = h$ と定義することにより、(4) 式は次のように表現できる。

$$p_a = (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g \cdot h \quad (5)$$

ゆえに

$$\text{grad } p_a = [(\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g] \text{grad } h \quad (6)$$

(6) 式は p_a の深度に対する増加率と h の深度に対する増加率との間には、1次関係が存在することを示している。すなわち、異常高圧部分での孔隙率の変化が片対数グラフ上で直線的 (h の増加率が深度に対して一定) (第3図A) であれば、 p_a の増加率も深度に対して一定となる (第3図B)。

$\text{grad } h$ と $\text{grad } p_a$ の範囲と相互の関係は次のとおり

第3図 頁岩孔隙率と過剰(流体)圧勾配 $\text{grad } p_a$ との関係を示す図

第4図 grad h と grad p_a の範囲を示す図

である。

1. grad $h > 1$ のとき grad $p_a > (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g$
2. grad $h = 1$ のとき grad $p_a = (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g$
3. grad $h < 1$ のとき grad $p_a < (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g$

これらの関係は第4図に示されている。

さて、 h の範囲について考えてみよう。深度 Z における流体圧 p の最大値はその深度における岩圧 S であるので

$$p \leq S = \bar{\rho}_{bw} \cdot g \cdot Z \quad (7)$$

(2) と (7) より

$$p_n + p_a \leq \bar{\rho}_{bw} \cdot g \cdot Z$$

ゆえに

$$p_a \leq \bar{\rho}_{bw} \cdot g \cdot Z - p_n = (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) g \cdot Z \quad (8)$$

(5) を (8) に代入すると

$$(\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g \cdot h \leq (\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g \cdot Z$$

$(\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) > 0$ ゆえ

$$h \leq Z \quad (9)$$

ゆえに h は Z に等しいか、または Z より小さな値でなければならない。(9) は定義により次のようにも表わされる。

$$Z - Z_e \leq Z$$

$$Z_e \geq 0 \quad (10)$$

すなわち、 Z_e は地表面以下でなければならない。

地表面から深度 Z までの全層が、地層水で飽和されている場合の p の最小値は静水圧である。したがって

$$p \geq p_n$$

または

$$p_a \geq 0 \quad (11)$$

(5) と (11) より

$$(\bar{\rho}_{bw} - \rho_w) \cdot g \cdot h \geq 0$$

ゆえに

$$h \geq 0 \quad (12)$$

したがって、(9) と (12) より h の範囲は次のとおり

$$(13)$$

である。

$$0 \leq h \leq Z \quad (13)$$

3. 上方移動と下方移動

第5図Aは新潟県紫雲寺ガス田における泥岩孔隙率垂直分布の1例である。2,750 m 以深の紫雲寺凝灰岩中に基盤岩トラップの類型と考えられるトラップが形成され、ガスが胚胎している。本凝灰岩中では静水圧が実測されているが、上位泥岩のうちの一部は異常高圧下にあるものと思われる⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾。また第5図Bは(1)式にもとづいて泥岩孔隙率垂直分布から求めた地下流体圧断面である。過剰圧の最大である2,450 m 付近を境にして、上位層中では圧緊水流が上方へ流れ、下位層中では下方へ流れたものと思われる。紫雲寺凝灰岩中のガス鉱床は、この下方への圧緊水流によって形成されたものと推定される⁽¹²⁾。最大過剰圧(すなわち最大異常孔隙率)の深度は、一般的には泥岩および下位貯留岩中における圧力分布状態と、これらの地層の浸透率によって変化するものと思われる。

さて、ここで第6図に示されているような模式的な頁岩一砂岩堆積盆地における、上方移動と下方移動につい

て考えてみよう。第6図においては、最下部に厚い、高浸透性の砂岩が存在し、地表にまでつながっている。この上位には頁岩が堆積している。頁岩の孔隙率と浸透率は一般的には深度とともに減少すると思われるので、頁岩中から圧緊により排出される流体の大部分は、上方へ向うものと考えられる。しかし、この高浸透率砂岩を一種の流体排出口と考えた場合には、少なくともこの砂岩直上の頁岩内からは、下方へ(すなわち砂岩の方へ)の流体の移動が起るものと思われる。その結果、上方移動と下方移動の境界面が現われるものと考えられる。上方への流体の移動の方が、下方へのそれに比べて一般に容易であることを考慮すれば、この境界面は頁岩の比較的下部のどこかにできるものと思われる。さきに述べた紫雲寺ガス田の例(第5図)は、この模式例によく類似している。では、第6図に示されているような模式例における上方移動と下方移動について考えてみよう。

頁岩の孔隙率-深度関係については、今日までにいくつか発表されているが、そのおもなものは Athy⁽¹³⁾, Hedberg⁽¹⁴⁾, Dickinson⁽¹⁵⁾ などによるものである[参考文献(10)の第7図をみよ]。Gulf Coast の第三紀層の資料にもとづく Dickinson の孔隙率-深度曲線が、他

第5図 新潟県紫雲寺ガス田における泥岩孔隙率垂直分布と流体圧断面の例

第6図 頁岩-砂岩堆積地域における頁岩孔隙率垂直分布と流体圧断面の模式例

の2種の曲線に比べて、同一深度に対し高い孔隙率を有するのは、多分この地域における異常高压に原因するものであろう。一方、同一深度に対して最も低い孔隙率を示す Athy の曲線は、これら3種の曲線のうちでは、最も圧緊平衡状態に近いものと考えられる。事実 Athy の曲線は、Oklahoma 州北部の比較的平坦な古生層の多数の頁岩と泥岩資料からえられたもので、堆積後の時間的経過を考慮すれば、Athy の曲線が最も圧緊平衡状態に近いものと考えることができるであろう。したがって、本文においては Athy の曲線を圧緊状態における頁岩孔隙率-深度関係と仮定し、この曲線を使用した。

頁岩の孔隙率と浸透率の関係については、ほとんど知られていない。しかし、本文においては、この関係をさぐる第1歩として、Kozeny の式⁽¹⁶⁾を使って検討してみる。すなわち浸透率を K 、孔隙率を ϕ とすると次の関係が成り立つ。

$$K = \frac{cd^2\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (14)$$

ここで、 c は定数、 d は岩石を構成する粒子の直径である。頁岩が圧緊されている間に d がどのようにに変化するかについては知られていない。しかし、本文においては d が圧緊中に変化しないものと仮定して検討した。

孔隙率と浸透率に関するもう1つの関係としては、Archie⁽¹⁷⁾によるものがある。Archie はアメリカの 11

の砂岩・石灰岩・泥質砂層についての測定の結果、孔隙率が 3% 増加すると浸透率が 10 倍になるという関係を導びいた。すなわち次のように表わされるものと思われる。

$$K = a \times 10^{0.03\phi} \quad (15)$$

ここで a は定数である。本文においては、これら2つの関係 (Kozeny, Archie) が孔隙率と浸透率の関係を知らずして使用された。

さて、ここで第6図の例にもどってみよう。この模式例では最下部に厚い、高浸透性の砂岩があって、地表にまで連続し、その流体圧は静水圧である。砂岩の上位に厚い頁岩層が速い速度で堆積したため、その中央部からの流体の排出が不十分であるものとしよう (第6図A)。すなわち、比較的高孔隙率、高浸透率な最上部の頁岩と高浸透性砂岩直上の頁岩は圧緊平衡に達して、流体圧が静水圧になっているが、中央部の頁岩は未圧緊で、流体圧が岩圧の一部を支えているために、異常高压になっているものと仮定しよう。この場合の頁岩孔隙率分布状態と流体圧断面の概念は、それぞれ第6図BとCに示されている。第6図Cによると、この場合頁岩中に流体動力学的環境が生じ、最大過剰圧の深度を境界にして、その上位では上方へ、その下位では下方への流体の移動が起ることが読みとれる。この模式例における上方移動ゾーンの $\text{grad } h$ は1より大きい。これは本文の第1図

(Δt —深度関係図), 参考文献 (8) の第 11 図, 参考文献 (9) の第 2 図, 参考文献 (12) の第 10 図などの例で経験しているように, 異常高圧地域でしばしばみられる現象である。この場合の上方移動ゾーンにおける最小孔隙率 (多分最小浸透率) は静水圧下にある上部頁岩基底, すなわち異常高圧下にある頁岩の直上に存在する。一方, 下方移動ゾーンの最小孔隙率は常に砂岩層の直上にある。

この状態からある時間が経過すると, 厚い頁岩内から流体がいくらか排出されて, 孔隙率と流体圧がやや減退する。最終段階においては, 頁岩が圧緊平衡に達するに十分な量の流体が排出されて, 流体圧は静水圧となる。

上方移動ゾーンと下方移動ゾーン内から排出される水量は, 各ゾーン内の最小浸透率 (多分最小孔隙率の深度に存在する) に関係するものと思われる。さらに単位底面積の頁岩柱を考える場合には, 排出水量の比が各ゾーンの厚さの比に等しいものと仮定すると, 次の関係が成り立つであろう。

$$\frac{L_u}{L_d} = \frac{K_u}{K_d} \quad (16)$$

ここで K_u と K_d はそれぞれ上方移動ゾーンと下方移動ゾーンにおける最小浸透率, L_u と L_d はそれぞれのゾーンの厚さである。

Kozeny の式 [(14) 式] によると, K_d と K_u は次のように表現できる。

$$K_u = \frac{cd^2\phi_u^3}{(1-\phi_u)^2} \quad (17)$$

そして

$$K_d = \frac{cd^2\phi_d^3}{(1-\phi_d)^2} \quad (18)$$

ここで, ϕ_u と ϕ_d はこの場合 (第 6 図 B) における各ゾーンの最小孔隙率である。さきにふれたとおり, d が圧緊により変化しないものと仮定すれば, (16) 式は次のように表わされる。

$$\frac{L_u}{L_d} = \frac{K_u}{K_d} = \left(\frac{\phi_u}{\phi_d} \right)^3 \left(\frac{1-\phi_d}{1-\phi_u} \right)^2 \quad (19)$$

同様に Archie の関係にもとづく L_u/L_d は

$$\frac{L_u}{L_d} = 10^{\frac{\phi_u - \phi_d}{0.03}} \quad (20)$$

と表わされる。本文では, (19) 式と (20) 式を使って, 模式的な頁岩—砂岩堆積盆地における, 上方移動ゾーンと下方移動ゾーンの境界面が求められた。

このような境界面ではなく, 上方移動と下方移動を境する境界ゾーン, すなわち最大過剰圧ゾーンが存在する場合にも, 同じ方法があてはめられ, L_u/L_d が決定できる。この場合の模式例は第 7 図に示されている。しか

第 7 図 最大過剰圧ゾーンが存在する場合における頁岩孔隙率垂直分布と流体圧断面の模式例

し第 7 図の場合において, L_u または L_d を個々に求めるときには, この最大過剰圧ゾーンの厚さを考慮に入れなければならない。(未完)

参考文献

- (1) Hottmann, C.E. and Johnson, R.K., Estimation of Formation Pressures from Log-Derived Shale Properties, *Journal of Petroleum Technology*, v. XVII, no. 6, p. 717-722, 1965.
- (2) Mac Gregor, J.R., Quantitative Determination of Reservoir Pressures from Conductivity Log, *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, v. 49, no. 9, p. 1502-1511, 1965.
- (3) Wallace, W.E., Logs Measure Abnormal Sub-surface Pressures, *Oil and Gas Journal*, v. 63, no. 27, p. 102, 1965.
- (4) Fons, L. and Holt, O., Formation Log Pressure Data Can Improve Drilling, *World Oil*, v. 163, no. 4, p. 70-74, 1966.
- (5) Foster, J.B. et al, Estimation of Formation Pressures from Electrical Surveys Offshore Louisiana, *Journal of Petroleum Technology*, v. XVIII, no. 2, p. 165-171, 1966.
- (6) Rogers, L.C., How Shell Controls Gulf Coast Pressures, *Oil and Gas Journal*, v. 64, no. 20, p. 264-266, 1966.
- (7) PGAC, Loganalysis Handbook, Pan Geo Atlas Corporation, Houston, Texas, 1966.
- (8) 真柄欽次, 長岡平野における泥質岩の圧緊と圧緊水流, 石技誌, 32 巻, 3 号, p. 111-119, 1967.
- (9) 真柄欽次, 検層データによる異常高圧層の判定, 石技誌, 31 巻, 2 号, p. 67-70, 1966.
- (10) 真柄欽次, 検層データによる油層圧の推定—紫雲寺ガス田における検討, 石技誌, 31 巻, 6 号, p. 266-273, 1966.

- (11) 真柄欽次, 異常高圧層の推定, 石技誌, 32 巻, 2 号, p. 85-87, 1967.
- (12) 真柄欽次, 紫雲寺ガス田における下方移動の可能性について, 石技誌, 32 巻, 1 号, p. 1-8, 1967.
- (13) Athy, L.F., Density, Porosity, and Compaction of Sedimentary Rocks, *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, v. 14, no. 1, p. 1-24, 1930.
- (14) Hedberg, H.D., Gravitational Compaction of Clays and Shales, *Amer. Jour. Science*, v. 31, no. 4, p. 241-287, 1936.
- (15) Dickinson, G., Geological Aspects of Abnormal Reservoir Pressures in Gulf Coast Louisiana, *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, v. 37, p. 410-432, 1953.
- (16) Pirson, S.J., Elements of Oil Reservoir Engineering, McGraw-Hill Book Company, INC., New York, 1958.
- (17) Archie, G.E., Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks, *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, v. 34, no. 5, p. 943-961, 1950.
- (18) Hubbert, M.K. and Rubey, W.W., Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting, I, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 70, no. 2, p. 115-166, 1959.