原 著 論 文

石油の生成・排出に関する要因としての年代層序*

中 山 一 夫**

(昭和57年11月24日受理)

Chrono-Stratigraphy as a Factor of Oil Generation and Expulsion

By

Kazuo NAKAYAMA

Abstract: Recent progress on Chrono-stratigraphy revised time scale in Pliocene and Pleistocene in Niigata sedimentary basin, Japan. It changed the burial history of Miocene source sediments in the area, but did not change the absolute geologic time of the sediments. Computer simulation model has been used to estimate the effect of geologic time interval on oil generation and expulsion. Two cases of model studies (one for old time scale, the other for new time scale) for the Miocene sediments have been conducted. It is concluded that, regardless of burial history, there is no significant difference of depths of oil generation nor expulsion between the two cases. Oil generation occurs in the 1800-2500 m interval and oil expulsion occurs in the 2500-3700 m interval in both cases.

Another model study on the effect of absolute time interval reveals that depth interval of oil generation and expulsion would be shallower by 1000 m if the geologic time of the Miocene sediments (8 MYBP) changes to early Paleocene (65 MYBP).

1. はじめに

近年著しく生層序学が発達し、特に第三系についてはかなり詳細なタイムスケールが完備しつつある。ある場合は従来の地質年代が一新された例もある (IGCP 114, 1981)。一方、石油地質の分野においては、主に地化学部門の発展が近年目覚しく、石油の生成について温度と時間が影響することが判明してきた (LOPATIN, 1971; CONNAN, 1974)。ここでは、石油の生成あるいは排出に対して、地質年代スケールの変更が、現実的な石油の探鉱にどれだけ影響を及ぼすものか (池辺, 1982) をコンピュータモデルを用いて考察する。

2. モデル概説

ここで使用されたコンピュータモデルは、次のような状況を仮定している。

① ある地点における地質コラムは、適当ないくつかの時間面によって区切られ、セルと呼ばれる直方体の均質な単体から構成される (中山, 1981の Fig. 1 参照)。このセルが地質時代を通じて埋没していき、内部の物理的・化学的特性が変化する。これをモデルにて計算処理する。

② セルの埋没に伴って、圧密作用により層厚が減少するが、このとき孔隙の物理的減少のみが考慮される。すなわち、次式に従って孔隙が減少する。

$$\left. \begin{aligned} \text{頁岩: } \phi_{sh} &= (\phi_0)_{sh} \cdot e^{-C\delta Z} \\ \text{砂岩: } \phi_{sa} &= (\phi_0)_{sa} - k \cdot Z \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 ϕ_0 = 初期孔隙率、 Z = 深度、 δ = 排出率、 C 、 k = 孔隙減退率、添字 sh は頁岩を、 sa は砂岩を表わす。岩相が頁岩と砂岩の間の場合には、各々の量比に応じて加重平均された孔隙率値が使用される。本論においては、

$$(\phi_0)_{sh} = 0.65, C = 0.00045$$

$$(\phi_0)_{sa} = 0.47, k = 0.000077$$

が用いられた。

* 第47回石油技術協会総会地質・探鉱部門「年代層序学の最近の進歩と石油探鉱への応用」にて講演 (昭和57年6月16日)

** 石油資源株式会社

図1 地質年代の同定が異なる2つの地質コラム。
かつてはケースⅡとされた年代層序がケースⅠに変更された。

TIME CORRELATION

③ ある地質時代におけるセルの温度 (T_c) は、地表温度 (ST) と古地温勾配 (GT) とから求められる。

$$T_c = ST + (GT) \cdot Z \quad (2)$$

ここで Z = セルの深度。

古地温勾配 (GT) は、その時代の基盤深度の関数であると仮定され (小椋, 1982), ここでは次式が使われている。

$$GT = GT_0 \cdot e^{-G \cdot Zb} \quad (3)$$

ここで GT_0 = 初期地温勾配 (基盤深度 = 0 のときの地温勾配), G = 地温勾配減退率, Zb = 基盤深度, 本論においては $GT_0 = 4.9^\circ\text{C}/100\text{m}$, $G = 8.5216 \times 10^{-5}$ が入力された。

④ 根源岩の熟成度は, LOPATIN (1971) 法により推定される。ただし, TTI (温度-時間指数) から Ro (ピトリナイト反射率) 値への変換は, 堆積盆独自の係数によりなされる。ここでは, 新潟地域の坑井データから推定された次式 (小椋, 1981, 1982) によった。

$$\log Ro = 0.07575 \cdot \log (TTI) - 0.2515 \quad (4)$$

⑤ 石油・ガスはケロゲンから生成される。ケロゲンとなる物質は, 全有機物質 (TOM) の 90% を占め (BARKER, 1979), そのうち究極的に石油・ガスに変換される割合-変換率 (X_0) - は, ケロゲンのタイプにより異なる註1。モデルにおいては, Visual Kerogen 分析により

得られたケロゲンタイプの組成比によって加重平均された値が用いられた。究極的に石油・ガスに変換される量を U とすると,

$$U = (X_0) (0.9) (TOM) \quad (5)$$

となる。このうち, 熟成のあるレベルにおける石油・ガスの生成量 ($GOIL$, $GGAS$) は次式で求められる。

$$\begin{aligned} GOIL &= ROIL \cdot U \\ GGAS &= RGAS \cdot U \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $ROIL$, $RGAS$ は, そのセルで生成される究極油・ガス量を 1 とした時, その熟成レベルで生成されている割合, つまり相対的な生成量を表わす。生成量カーブは任意性のある (Ro , $ROIL$, $RGAS$) の組合せで入力される。表1に入力された値を示す。

表1 生成量カーブとして入力された値。

Ro	$ROIL$	$RGAS$
0.30	0.00	0.00
0.50	0.23	0.03
0.675	0.33	0.05
0.75	0.40	0.08
1.00	0.00	0.64
1.60	0.00	0.92
2.00	0.00	1.00

⑥ 地層圧上昇の原因としては, 上載加重圧の増加 (RUBEY and HUBBERT, 1959), 温度上昇による孔隙水の膨張 (Aquathermal Expansion) (BARKER, 1972), 石油・ガス生成による孔隙内流体の体積増加 (HUNT, 1979), 粘土の層間水排出における水の体積膨張註2 (POWERS, 1967) の4つを考慮する。

⑦ 上昇した地層圧は, 地質時間を通じて次式に従って減圧する (RUBEY and HUBBERT, 1959)。

$$P_A = \kappa T + (P_0 - \kappa \cdot T)^{-1/T} \quad (7)$$

ここで P_A = 残留異常圧, P_0 = 初期異常圧, κ = 圧力上昇率, t = 地質時間, T = リラクセーションタイム。 T は, 各流体の浸透率 (k), 粘性率 (μ), 圧縮率 (C) とから推定される。

$$T = RAA / \left(\frac{k_w}{\mu_w \cdot V_w \cdot C_w} + \frac{k_o}{\mu_o \cdot V_o \cdot C_o} + \frac{k_g}{\mu_g \cdot V_g \cdot C_g} \right) \quad (8)$$

ここで V = 流体体積, 添字 w, o, g は各々水, 石油, ガスを表わす。また RAA は, P_A が既知である点でキャリブレーションされた値が用いられる。

⑧ 浸透率 (K) は, キャピラリイモデルによる次式で計算される (CRAFT and HAWKINS, 1967)。

註1 Dow (1977) による変換率 = 0.53, 0.28, 0.16 (各々タイプ I, II, III に対応) がここでは仮定された。

註2 層間水 (密度 = 1.2 ~ 1.4 g/cc) が排出されて孔隙水 (自由水) になると密度が小さく (約 1.0 g/cc) なる。この密度減少分だけ体積が膨張すると考えられる。

図2 ケース別のセル1の埋没履歴とそのセルからの石油の生成・排出。この図から時期および深度が読みとれる。

図3 セル1からの石油の生成・排出率の時間的変化。

$$K = (1.013) (10^8) (\phi \cdot \tau^2) / 8c^2 \quad (9)$$

ここで ϕ = 孔隙率, τ = 孔隙半径, τ = tortuosity 註3。

⑨ 結果として P_A となるように、水・石油・ガスの相当量が排出されるが、この時の排出率はダルシーの法則に従う。このとき相対浸透率は各々の流体の飽和率によって決定される。例えば、石油生成の初期においては、石油の飽和率が低いために相対浸透率も低く、水が主に排出されるが、ある程度水が排出され、孔隙内での石油の生成が進むと、石油の飽和率が増し、石油の排出率が加速されるであろう。

⑩ 前項においては、石油・ガスの独立相による排出機構が仮定されている。ただし、ガスについては、溶解率を与えて、水・石油に溶解して排出される分をも考慮

している (MAGARA, 1978)。

3. モデル実験

前述のコンピューターモデルを用いて、タイムスケールの変更が、石油の生成・排出にどのような影響を及ぼすかを実験した。図1は新潟堆積盆をモデルにした5,000 mの仮想的な地質コラムである。ケースIとケースIIは同じ坑井でありながら、地質年代の同定が変化した例を示す。ケースIでは、上部層(D, E, F層)の地質年代がケースIIよりもかなり若く同定されている(最近の生層序学の研究によってかつての鮮新世以降の地層がより若く同定されている; IGCP 114, 1981)。いま、最下位A層の基底堆積物(A層を4つに区分した最下位のセル=以下セル1と呼ぶ)に注目すると、ケースI, IIにおいて、セル1の地質年代は同じ(16 MYBP)であるが、上部層のタイムスケールが違うので、2者の埋没履歴が

註3 屈曲した毛細管沿いに測定した長さ L' を、毛細管の出入口の直線距離 L で割った値。毛細管が直線状であれば $\tau=1$ 、屈曲度が大きくなるほど τ は増す。

図 4 セル 1 からの石油の生成・排出率の対深度変化。

異なる。図 2 に、2 者の埋没カーブと、セル 1 からの石油の生成・排出の主たる時期を示した。

3.1 石油の生成・排出時期

図 3 に、セル 1 における生成率、排出率註 4 の時間に対する変化を示した。図 3 によれば、石油の生成は 10～7 MYBP (ケース I)、あるいは 10～8 MYBP (ケース II) であり、大きな時期のずれはない。石油生成の時期まで (16～7 MYBP) は、両ケース共に埋没履歴に大きな差異はなかった (図 2)。

一方、排出時期については、ケース I で、7～4 MYBP、ケース II で 8～6 MYBP であり、有意的な時期のずれが観察される (図 3)。しかしながら両ケースとも、この時期は D 層～E 層下部の堆積する時代にあたり (図 2)、たとえ地質年代がこの例のように変更されても、排出時期を D 層～E 層下部堆積期としている限り (絶対年代に言及しない限り) 支障はない。

3.2 石油の生成・排出深度

生成率、排出率を埋没深度軸に投影したものが図 4 である。同図によれば、両ケースとも約 1,800～2,500m で石油の生成が起こり、約 2,500～3,700m で排出されている。この例で示す限り我々は、生成・排出を堆積物の埋没深度で考えてよい。

図 5 石油の生成・排出率に及ぼす地質時間の影響。

註 4 生成率、排出率とは、その率で生成・排出が 1 MY 持続したとき、生成・排出される量の地表における体積 (セル内のマトリックスを 1 とする) である。

4. 結 論

化学反応速度論の立場では、有機物の熟成は温度に対しては指数関数的に、時間に対しては一次関数的に進むとされている (BARKER, 1979)。ここでは、具体例を用いて時間要因の石油の生成・排出への影響を調べた。実験結果によれば、少なくとも本邦裏日本の含油第三系に関する限り、最近の生層序学による過去の地質年代スケール (特に鮮新世以降) の書き換えによって、石油の生成・排出の相対的時期が変化することがなかった。すなわち、絶対年代の変更にかかわらず、D層～E層下部堆積期に石油は生成され、D層上部～E層堆積期にかけて排出されたと表現することができる。

この実験例においては、対象としている堆積物の絶対年代 (16 MYBP) は変化させず、与時間内における埋没履歴の違いを比較している。対象堆積物の地質年代が変化したら、石油の生成・排出の深度がどう変化するかを示したものが図5である。同図からは、石油の生成・排出の深度が、中新世後期のものと暁新世初期のもので約1,000mずれていることが判る。また、堆積速度が小さくなるため、排出率は時代が古くなるほど小さくなることが観察される。我々は石油探鉱の現実において、対象層の年代同定誤差による生成・排出の深度差が図5程度であるということを概念的ではあるが知っておく必要があるだろう。ただし、図5は新潟堆積盆をモデルにした場合であって、深度や生成・排出率などの値は一般的なものではない。対象地域の地質パラメーターによって、深度、量 (率) とともに変化するので、地域ごとにモデル実験をすることが望ましい。新潟堆積盆における最下位の堆積物 (石油根源岩を対象としているので七谷層泥岩部の最下位をさす) に関して、準定量化したものとして、ここに挙げた実験結果は意味をもつと思われる。

謝 辞

本稿を草するにあたり、データの公表を許可された石油資源開発常務取締役鯨岡明博士に感謝の意を表す。また常日頃、有意義な討論をし、情報を提供して載っている本社探鉱部、技術研究所の方々、および貴重な坑井データを得るために努力しておられる現場の方々にここに記して感謝の意を表す。

文 献

BARKER, C. (1972): Aquathermal pressuring—role of

temperature in development of abnormal-pressure zones. *A.A.P.G. Bull.*, vol. 56, pp. 2068-2071.

— (1979): Organic geochemistry in petroleum exploration. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Continuing Education course note*, no. 10, 159p.

CRAFT, B.C. and M.F. HAWKINS Jr., (1967): *Applied Petroleum Reservoir Engineering*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 437p.

CONNAN, J. (1974): Time-temperature relation in oil genesis. *A.A.P.G. Bull.*, vol. 58, pp. 2516-2521.

DOW, W.G. (1977): Kerogen studies and geological interpretations. *Jour. Geochemical Exploration*, vol. 7, pp. 79-99.

HUNT, J.M. (1979): *Petroleum Geochemistry and Geology*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, 617p.

IGCP-114 (National Working Group of Japan) (1981): 日本の新第三系生層序及び年代層序に関する基本資料 [続編], 土 隆一編, 156p.

池辺 穰 (1982): 新潟新第三系積成盆地における最近の諸問題. 地質学雑誌, vol. 88, pp. 775-785.

LOPATIN, N.V. (1971): Temperature and geologic time as factors in coalification. *Izv. Akad. Nauk. Uzv. SSR*, ser. Geol., vol. 3, pp. 95-106; English transl. by N.H. Bostik, Illinois State Geol. Survey, 1972.

MAGARA, K. (1978): Compaction and fluid migration. *Developments in Petroleum Science* no. 9, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 319p.

中山一夫 (1981): 探鉱のためのシミュレーションモデル—原理および東新潟地域への応用—. 石技誌, vol. 46, pp. 221-236.

小椋伸幸 (1981): Lopatin 法による熟成度の推定 (演旨). 石技誌, vol. 46, p. 267.

— (1982): 新潟堆積盆における石油根源岩熟成度履歴の推定. *Researches in Organic Geochemistry*, vol. 3, pp. 29-35.

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.

RUBEY, W.W. and M.K. HUBBERT (1959): Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting II. *Bull. Geol. Soc. America*, vol. 70, pp. 167-206.