論 文

等価粒径法*

—石油探鉱におけるトップシール能力評価の重要性—

沢村 史了**・中山 一夫***・高橋 利宏***

(Received August 31, 2005 ; accepted January 13, 2006)

Equivalent grain size method – Importance of top seal evaluation for exploration –

Fuminori Sawamura, Kazuo Nakayama and Toshihiro Takahashi

Abstract : “Equivalent grain size (EGS) method” is a unique approach to represent the top seal capacity in terms of the ideal grain size. Theoretical consideration of the capillary seals suggests that the capillary pressure, which controls the seal capacity, depends on the size of the pore-throat. The EGS method uses the pore-throat size calculated from known or measurable parameters, such as hydrocarbon column height, fluid densities, contact angle, and interfacial tension. Furthermore, the pore-throat size can be converted to porosity and the grain size by the experimentally derived function.

Gas, which is less than oil in density, behaves to migrate above the oil column in a trap. Consequently, only gas would be entrapped in such a trap where the trap height is smaller than the maximum gas column height which can be held by top seal capacity, whereas such a trap where the trap height is larger than the maximum oil column height would be dominated by oil. This point of view and case studies in this paper demonstrate that the relationship between the trap height and the top seal capacity plays also important role to determine the hydrocarbon fill (oil or gas) as well as the geochemical factors.

Thus, the EGS method can provide new insights into understanding hydrocarbon fill patterns in fields and prospects.

Key words : equivalent grain size method, top seal capacity, capillary pressure, pore-throat size, trap height, maximum oil and gas column height, hydrocarbon fill pattern

1. はじめに

炭化水素鉱床の形成において、貯留岩を覆って炭化水素の上方移動を遮断するトップシールの存在は不可欠である。トップシールが保持できる炭化水素量には限界がある。このシールの有限性、すなわちシール能力は埋蔵

量の評価に直接かかわる問題である。また、近年の「石油システム」概念の発展によって、トラップに集積する炭化水素の種類（石油か？ガスか？）を規定する要素としてのシールの重要性も指摘されている（例えば、Sales, 1997）。しかしながら、これまで提唱されてきたシールに関する理論やモデルが、実際の石油探鉱に十分に活用されているとはいいがたい。このような現状に対して、筆者らはシール能力の定量的な評価法である「等価粒径法」を提唱し、実際のフィールドへの適用を試みてきた（Nakayama and Sato, 2002 ; Sawamura and Nakayama, 2005）。

石油探鉱において、貯留岩自体の物性や地質学的特性を把握することは重要な課題の1つである。同時に、より大きな視野で貯留岩を「器」として論ずる場合、シー

* 平成17年6月1日、平成17年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「多様な貯留層を対象にした特性解析技術の進展」で講演 This paper was presented at the 2005 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Recent progress in characterization and analysis for various types of reservoirs” held in Tokyo, Japan, on June 1, 2005.

** 石油資源開発株式会社 Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

*** 株式会社地球科学総合研究所 JGI, Inc.

ルという観点からのアプローチも必要と思われる。本論では、シール能力評価の重要性に関する議論を目的として、まずシールという現象および石油・ガス差別集積に関して、これまでに提唱されてきた理論的考察を整理する。次いで、「等価粒径法」によるシール能力評価の概念と方法論について述べる。さらに、同手法を実際のフィールドに適用した例を紹介して、シールと石油・ガス分布との関連性について議論する。

2. シールのメカニズム

2.1 キャピラリーシール

工学的時間スケールにおける流体移動に対しては「動的 (Dynamic)」なモデルが必要とされる一方で、地質学的時間スケールにおける炭化水素の二次移動に関して「静的 (Static)」な流体移動モデルが提唱されてきた (Berg, 1975; Schowalter, 1979; Watts, 1987; England *et al.*, 1987; Catalan *et al.*, 1992)。「静的」モデルでは、炭化水素の移動は浮力およびキャピラリー (毛細管) 圧によって規定される。浮力は炭化水素と地層水との密度差によって生ずるもので、炭化水素が上方へ移動する主因となる。ただし、水濡れ (water wet) の状態にある孔隙中を炭化水素が上方移動するためには、そこに働くキャ

ピラリー圧を超過することが必要となる。したがって、キャピラリー圧が炭化水素の浮力より大きな状態では、炭化水素の移動は遮断されることになる (キャピラリーシールの成立; 図 1)。炭化水素の浮力 (P_b)、およびキャピラリーシールの能力を規定するキャピラリー圧 (P_c) は、それぞれ以下の式にて求められる (Berg, 1975)。

$$P_b = g \cdot H_c \cdot (\rho_w - \rho_h) \quad (1) \text{式}$$

$$P_c = 2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta / R \quad (2) \text{式}$$

ここで、 g は重力加速度、 H_c は炭化水素コラム高、 ρ_w 、 ρ_h はそれぞれ地層水、炭化水素の密度である。また、 γ は水-炭化水素間の界面張力、 θ は接触角、 R は孔隙のくびれ半径である。

(2) 式に示すように、孔隙径が小さくなるほどキャピラリー圧は高くなるため、一般的に孔隙径が著しく小さい泥質岩や蒸発岩は高いシール能力を有することとなる。炭化水素の上方移動がシールに遮断されることにより、トラップでは炭化水素の集積が始まる。集積の進行とともに、炭化水素のコラム高が成長して浮力も増加する。キャピラリーシールは有限であるため、増加する浮力がキャピラリー圧を超えたときには、超過分の炭化水素は貯留層を覆うシール (トップシール) から上方へ漏出すると考えられる (図 2a)。ただし、シールが保持しうるコラム高に比べてトラップの高さ、すなわちトラップ頂部からスピルポイントまでの比高が小さい場合、炭化水素はトラップ頂部からスピルポイントまで集積した後、余剰分はスピルポイントを通じて側方へ移動する (図 2b)。

2.2 石油・ガスの差別集積論

石油もしくはガスが選択的に貯留もしくは排出される可能性を示したモデルは 1950 年代より提唱されてきた (例えば、Gussow, 1954; Sales, 1997)。ガスは石油に比べて著しく密度が小さい。このため、(1) 式に示すように、地層水との密度差がより大きなガスは石油よりも大きな

図 1 キャピラリーシール概念図

図 2 トラップからの炭化水素流出のメカニズム

トラップに集積する炭化水素の限度は、シール能力 (図中 a) もしくはトラップ自体の「器」の高さ (図中 b) に規定される。

浮力を有する。したがって、あるトラップにおいてシールが保持しうる最大のガスコラム（最大ガスコラム高）は、同じシールが保持できる石油コラム（最大石油コラム高）より常に小さい（Watts, 1987）。また、一般的な炭化水素の生成・移動過程、すなわち石油の生成・排出が生じた後に、ガスが供給されてきた状況を仮定した場合、相対的に「軽い」ガスは、先に集積していた「重い」石油をトラップの下方（ダウンドィップ）に押し下げながら、優先的にトラップ頂部から貯留されていくと考えられる。このような考察に基づいて、Sales は最大油コラム高、最大ガスコラム高およびトラップ高の大小関係からトラップを次の3つのタイプに分類して、それぞれのタイプに特徴的な石油・ガスの集積メカニズムを示した（各タイプの名称は Sawamura and Nakayama, 2005 による）。

【キャピラリートラップ（Pure Capillary Limited Trap）】スピルポイントが最大油およびガスコラムの下限より深いタイプである（図3）。このようなトラップに十分な量の石油・ガスが移動してきた場合、余剰となる石油およびガスはトップシールから漏出する。とりわけ、「軽い」ガスはトラップの上方へと移動するため、下位の石油コラムの浮力によって押し上げられて優先的にトップシールから漏出する。このときシール/貯留岩境界において、界面張力が油・水からガス・水に置換されるため、キャピラリ圧がやや増加して、わずかにガスが集積すると考えられる。ただし、それ以上のガスが流入してきても、トップシールを通じて漏出するため、トラップ内に貯留されない。結果として、同タイプには選択的に石油が集積すると想定される。

【スピルポイントトラップ（Pure Spill-point Limited Trap）】スピルポイントが最大油およびガスコラムの下限より浅いタイプである（図4）。このようなトラップでは、密度が小さいガスは優先的に頂部から貯留される

と同時に、石油コラムは下方に押し下げられてスピルポイントからトラップ外へ側方移動する。このとき、トップシールからの漏出は発生せずに、トラップ内の流体はガスに占められる。同タイプはガス指向のトラップと考えられる。

【混合型トラップ（Capillary and Spill-point Mixed Trap）】スピルポイントが最大油コラム下限とガスコラム下限の中間に位置するタイプである（図5）。混合型トラップでは、ガスの移動・集積に伴い、石油コラムは下方に押し下げられてスピルポイントからトラップ外へ側方移動する。ただし、スピルポイントトラップの場合と異なり、石油とガスの合計浮力がキャピラリ圧と等しくなった時点で、さらにガスの供給が続いても、集積することなく上方シールから漏出する。このため、トラップ全体がガスに占有されることなく、下部には石油が貯留されると考えられる。

石油・ガス差別集積論の重要な点は、トラップを満たすのに十分な量の石油とガスが移動してきても、シール能力とトラップ高の関係によって集積する炭化水素の種類が規定される可能性を指摘していることにある。この概念に従えば、あるトラップにおいてガスのみが見え

図4 最大石油・ガスコラム高とトラップ高によるトラップ分類 (2)：スピルポイントトラップ
十分な量の石油・ガスが流入してきても、トラップ高が最大石油・ガスコラム高よりも小さいトラップではガスが選択的に貯留される。

図3 最大石油・ガスコラム高とトラップ高によるトラップ分類 (1)：キャピラリートラップ
十分な量の石油・ガスが流入してきても、トラップ高が最大石油・ガスコラム高よりも大きいトラップでは石油が選択的に貯留される。

図5 最大石油・ガスコラム高とトラップ高によるトラップ分類 (3)：混合型トラップ
トラップ高が最大石油コラム高よりも小さいが、最大ガスコラム高より大きなトラップでは石油とガスの双方が貯留される。

れたとしても、その結果は地域的なスケールでの石油の生成・移動の可能性を否定するものではなく、シール能力とトラップ高に規定されたトラップ自体の特性として解釈することも可能となる。

3. 等価粒径法：シール能力の定量的評価

前章で述べたように、シールが保持しうる石油・ガスのコラム高を推定することは、埋蔵量評価だけではなく、石油・ガス分布の推定につながる重要な課題である。「等価粒径法」は、1) 浮力-キャピラリー圧平衡式に基づき、2) 実際の石油・ガスコラム高からキャピラリー圧を逆演算して、3) 等価粒径という概念を用いて、帽岩のシール特性を定量的に表現する手法である。キャピラリーシールの概念を応用したシール能力の評価手法はこれまでも提唱されてきたが、次に述べるように、「等価粒径法」は複雑かつ多様な地質条件に影響されるシール能力を巨視的観点（マクロ的な視野）から推定する点で、より実際の石油探鉱に即した手法である。

3.1 浮力-キャピラリー圧平衡式

キャピラリーシールの概念によると、シール能力の限界まで炭化水素が集積している状況において、浮力 (P_b) とキャピラリー圧 (P_c) は平衡状態にあると考えられる。この状態は、前章の (1) 式および (2) 式を用いることによって次の平衡式で表される。

$$2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta / R = g \cdot H_c \cdot (\rho_w - \rho_h)$$

ここで、変数は浮力およびキャピラリー圧の計算で用いたものと同様である。この平衡式に接触角 (θ)、地下状態における界面張力 (γ) および流体密度 (ρ) を与えることにより、シールが保持しうる炭化水素の最大コラム高 (H_c) は孔隙のくびれ半径 (R) の関数として表すことが可能である。

浮力-キャピラリー圧平衡式に基づくシール能力評価として、水銀圧入法により岩石試料のキャピラリー圧を直接測定する手法がある (Schowalter, 1979)。同手法は比較的簡便であり、実際の岩石物性を反映することから広く用いられているが、測定に適する良質な泥質岩試料とともに、測定値がトラップ全体を覆うシールを代表するとの仮定を必要とする (Downey, 1994)。しかしながら、キャピラリー圧を規定する孔隙のくびれ径が一様な帽岩は存在しないだろう。実際には、Catalan *et al.* (1992) による人工シール実験で示されたように、炭化水素は限定された「通り道」、すなわち大きな径のくびれを選択的に通って移動・漏出すると考えられる。また、Dewhurst and Henning (2003) は、オーストラリアのカーナボンベーズンにおける実際のガスコラム高がキャピラリー圧の測定結果から推定されるシール能力に比べて著しく低

いことから、断層やフラクチャーによるトップシール能力劣化の可能性を指摘している。このような研究例は、点である岩石試料の測定値を広大な範囲に分布するトップシールに適用する困難さを示すものである。

3.2 キャピラリー圧のインバース推定

水銀圧入法によるシール評価法が含む問題に対して、筆者らは油ガス田における実際の石油・ガスコラム高からシールのくびれ径を逆に推定する手法を提唱してきた (Nakayama and Sato, 2002; Sawamura and Nakayama, 2005)。ベースンモデリングをはじめとする地化学的見地から推定されるキッチンエリアでの炭化水素生成量はトラップに集積する量に比べて格段に多い (例えば、Magoon and Valin, 1994)。このため、キッチンエリアからトラップまでの炭化水素の移動効率が低い場合においては、油・ガス田の形成時にトラップを飽和するのに十分な量の炭化水素が流入しており、そのコラム高はシール能力もしくはトラップ高の限界に一致すると考えることができる。

前章で述べたトラップ分類によると、キャピラリートラップおよび混合型トラップでは、石油とガスの合計浮力がシールのキャピラリー圧と平衡状態にある。したがって、浮力-キャピラリー圧平衡式を用いることにより炭化水素コラム高からインバース推定されるキャピラリー圧は対象トラップにおけるシール能力を示すものである。一方で、スピルポイントトラップでは浮力はキャピラリー圧よりも常に低いため、インバースの手法により求められるキャピラリー圧は実際より低い「見かけ」の値となる。換言すると、端水面がスピルポイントよりも浅い深度に位置するフィールド（キャピラリートラップ）や石油とガスが集積しているフィールド（混合型トラップ＝端水面がスピルポイントに一致している）においてのみ、炭化水素コラム高からのインバース手法が有効となる。このインバース推定により求められたシールのくびれ径は、Schowalter の手法と違って現実のくびれ径と一致するとは限らないが、広範囲に分布するトップシール全体の「有効」シール能力を示す指標とみなすことができる。

3.3 シールくびれ径-等価粒径の変換

インバース的な手法により、現実の石油・ガスコラム高から推定されるシールのくびれ径は、実際の油・ガス田成立にかかわる「有効」シール能力の指標となる。ただし、このくびれ径は圧密の度合いによって変化するために、埋没による影響を合わせてシール能力を考慮する必要がある。このような議論を簡便化するために考案された概念が「等価粒径」である。Nakayama and Van Siclen (1981) は、シールとなる堆積物が同じ径を持つ

球形の粒子から構成されると仮定した場合に、その仮想粒子の径（等価粒径）とシール孔隙のくびれ直径の比は孔隙率の関数として表されることを示し、その関係を単純な幾何計算から理論的に推定した。この考察を基にして、Nakayama and Sato (2002) は、ガラスビーズを用いた人工シールによる物理実験から次に示す関係式を導き出した（図6、図7）。

$$2R/Dm = 3.085 \cdot \phi^2 + 0.2087 \cdot \phi \quad (3) \text{式}$$

ここで、 R は孔隙のくびれ半径、 Dm は等価粒径、 ϕ は孔隙率である。(3)式は、シール能力に直接かわるくびれ径を等価粒径および孔隙率に置き換えるものであり、これにより埋没の影響（孔隙率）とは別に帽岩の初

生的なシール特性を「等価粒径」というパラメータによって示すことが可能となる。

初生的なシール特性が岩相・岩質に大きく依存するものであるならば、同じ岩相・岩質の帽岩間の等価粒径は同じ値となる。また、等価粒径が同じである場合には、シール能力差は孔隙率、すなわち埋没深度の差に起因するととらえることができる。この考察を進めると、あるフィールドにて確認された石油・ガスコラム高から適切な等価粒径が求められるならば、その値を同じ環境下で堆積した近隣の帽岩へ適用することにより、未掘削のブロスベクトやリードにおけるシール能力、すなわちシールに保持される最大石油・ガスコラムの高さを予察する

図6 パッキングタイプによる孔隙のくびれ径の変化

ある堆積物を構成する粒子の径が同じであっても、孔隙のくびれ径はそれぞれのパッキングタイプによって異なる値を示す。理論的に孔隙のくびれ径と粒径の比は孔隙率の関数によって表わされる。

図7 孔隙のくびれ径/粒径 ($2R/Dm$) - 孔隙率の関係式

破線で示した関係式は図6のパッキングタイプに基づく幾何学的考察からの推定 (Nakayama and Van Siclen, 1981)、実線で示した関係式は人工シールを用いた実験結果による (Nakayama and Sato, 2002)。

図8 対象地域の地下構造および石油・ガス分布図 (Sawamura and Nakayama, 2005 を編集)
等深度線は貯留岩層準上限を示す。

ことが可能となる。今後、さらなる実証的な検討を通じて、等価粒径と堆積環境の関係がより明らかに示されることが期待される。

4. ケーススタディ (その1)

実存する油・ガス田群を対象に、石油・ガスコラム高からシールの等価粒径を算出して、シール能力と石油・ガス分布との関連性について考察した例を紹介する。図8や図9に示すように、3つの油・ガス田(A, B, C)はいずれも、貯留岩である砂岩が側方へ遷移した非浸透性岩をシールとするトラップに形成された鉱床である。対象油・ガス田が分布する地域において、貯留岩層は大局的に南傾斜の同斜構造を示す一方で、側方への著しい岩相変化を特徴とする。このため、良好な貯留岩性状を有する岩相の分布は限定されており、それぞれに独立したプールの非浸透性岩に画されて存在する。

4.1 等価粒径の算出

トラップを満たすのに十分な量の炭化水素が供給されたと仮定すると、石油とガスが集積している対象フィールドでは、いずれも炭化水素の浮力とキャピラリー圧は平衡状態にあると考えられる。(1)式に示したように、浮力は炭化水素のコラム高、重力加速度および水と炭化水素の比重差の積によって求めることができる。A油・ガス田では高さ21 mの石油コラムと51 mのガスコラムが認められており、その合計浮力は次のように算出される。

$$\begin{aligned}
 Pb &= \{21 \text{ m} \cdot 9.81 \text{ m/sec}^2 \cdot (1.23 \text{ g/cm}^3 - 0.76 \text{ g/cm}^3)\} \\
 &+ \{51 \text{ m} \cdot 9.81 \text{ m/sec}^2 \cdot (1.23 \text{ g/cm}^3 - 0.30 \text{ g/cm}^3)\} \\
 &= 0.562 \cdot 10^6 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

図9 BおよびC油・ガス田地質断面図 (Sawamura and Nakayama, 2005 を編集)
aおよびa'の位置は図8を参照。

浮力の算出にはトップシール(貯留層上限)深度における流体密度の推定値を用いている。これらの値は、地表での密度データをSchowalter (1979) の式によって変換したものである。浮力-キャピラリー圧平衡式により、シールのくびれ半径(R)は次のように算出される。

$$R = 2 \cdot 46.84 \text{ mN/m} / 0.562 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 0.000166 \text{ mm}$$

キャピラリー圧の算出では接触角を 0° と仮定している。また、メタン-水の界面張力はSchowalter (1979) を参照した。

等価粒径を算出するには、浮力からの逆演算から求めたシールのくびれ径に加えてトップシール深度における孔隙率を推定する必要がある。本スタディ地域における深度-シール孔隙率(ϕ_{seal})の関係は、コア試料の孔隙率測定データに基づいた次の式によって表される。

$$\phi_{\text{seal}} (\%) = 60 \cdot e^{-0.00070 \cdot \text{深度}(\text{m})}$$

トップシール深度におけるシールの孔隙率、およびくびれ径を (3) 式に適用した結果、A 油・ガス田におけるシール等価粒径は 8.06 phi ($2^{-\text{phi}} = \text{mm}$) と推定される。また、同様の手法により推定されたシール等価粒径は、B 油・ガス田にて 8.00 phi、C 油・ガス田にて 8.61 phi となる。

A と B における等価粒径は非常に近似した値を示す一方で、C 油・ガス田の等価粒径は前者に比べて高い phi 値となる。このことは、C におけるシールが A および B よりも高い能力を有することを示すものである。筆者らの経験によると、近接した複数のフィールドにおけるシールが、例えば外洋性のように、類似した環境で堆積したものであれば、それらの等価粒径はほぼ近似する (± 0.15 phi 程度)。本ケーススタディにおける等価粒径 (シール能力) の違いは、同地域における地質の特徴である側方への著しい岩相変化を反映する可能性が考えられる。

4.2 A および B 油ガス田における石油・ガス貯留過程の考察

A および B 油・ガス田において、シール等価粒径は非常に近い値を示し、また界面張力や地層流体密度に影響を与えるトップシール深度もほぼ同じであることから、両フィールドにおけるシール能力は同程度と考えられる。しかしながら、A において石油コラムはガスコラムの半分以下の高さであるのに対して、B では石油コラム高 (45m) がガスコラム高 (35m) を上回る。この石油・ガス分布の違いは、図 10 に示すようにトラップの

ジオメトリの違いによって合理的に解釈することができる。

一般的に炭化水素の生成・排出過程は、はじめに石油が生成・排出され、根源岩熟成の進行に伴ってガスが生成されると考えられている。熟成初期、すなわち石油の生成・移動の時期では、トラップの上方に向かって移動してきた石油は、トップシールによって移動が妨げられ貯留されてゆく。シールが保持しうるコラム高まで石油は貯留されるが、シール能力を超えてトラップ中に供給された分はトップシールを打ち破って上方へリークする。このとき、A と B におけるシール能力はほぼ同等と推定されるため、両トラップ中に貯留された石油コラム高はほぼ等しかつたと考えられる。ただし、石油の体積は主としてトラップの形状によって規制される。

石油の生成・排出が終了し、続いて生成されたガスがトラップ内に流入してくると、相対的に密度の低いガスはトラップ頂部から、石油コラムを押し下げながら貯留される。下方に押し下げられた石油の体積はガスの流入前と同じだが、そのコラム高はトラップの形状によって変化する。すなわち、A のトラップは、底面積が頂部から下部に向かって顕著に増加する形状であるため、ガスの流入後に下方に押し下げられる石油のコラム高および浮力は著しく減少する。これに対して、B のトラップでは底面積が深度によって大きく変化しないので、ガスの流入に伴い下方に押し下げられる際の石油コラム高の減少は少ない。トップシールではキャピラリー圧と石油・ガスの合計浮力が均衡することから、下方に押し下げられて石油の浮力が減少した分、ガスはトップシールに保

図 10 A および B 油・ガス田における炭化水素の集積過程推定図 (Sawamura and Nakayama, 2005 を編集)

持される。したがって、ガス流入後の石油コラム高の減少がより顕著な A 油・ガス田のシールは、B に比べて高いガスコラムを保持することができる。このようなガス流入後の石油コラム高の変化の差が、両フィールドにおけるガスのコラム高および体積に大きく影響すると考えられる。

5. ケーススタディ (その 2)

キャピラリーシール理論に基づくシール能力評価の応用として、層位封鎖型鉱床における複数の砂岩体の導通を考察した例を紹介する。対象フィールドの概要を図 11 に示す。貯留層である砂岩体は同斜構造をなし、構造上部に向かって尖滅する。貯留層分布の特徴から、対象フィールドは 3 つのプールに区分される。ただし、各プール間の導通の有無は不明である。このため、石油・ガスの胚胎が既存坑井で確認されているものの、それらの分布 (流体境界深度) には不明な点が多い。とりわけ、砂岩体の堆積後に形成されたと考えられる、泥質堆積物に埋積されたチャネル (マッドフィルチャネル) の側方シール性の有無、もしくは導通深度の評価は、石油・ガスの分布を推定する上で大きく影響する。

既存坑井では地層圧力の測定も実施されており、プール A および C における水層の圧力データから、両プールは圧力的に不導通であると考えられる。しかしながら、その他の測定結果についてさまざまな解釈が提案されており、完全な導通路の理解には至っていない。本応用例では、各坑井での産出流体とシール理論から次に記す集積モデルケースを構築し、導通深度と油ガスの集積の関係を考察した。

- 1) ケース I: プール A と B がマッドフィルチャネルによって完全に隔離されている場合、A および B-C にそれぞれ独立した混合型トラップが形成されたと考えられる (図 12)。このとき、油水境界面 (OWC) は、それぞれ A および C の構造スピルポイントに一致する。また、ガス油境界面 (GOC) は A と B におけるそれぞれのトップシール能力に規定される。2 つのトラップは異なる圧力システムにあるため、地層圧力プロファイルにはそれぞれ 2 つのガス、石油および水の圧力トレンド線が示される (線の勾配は流体密度による)。
- 2) ケース II: プール A と B が、A の構造スピルポイントより深い深度にて導通している場合、ケース I と同じく、両プールはそれぞれ別個の流体境界面を有すると考えられる (図 13)。ただし、ケース I と異なり、プール B の OWC は上記の導通深度に一致する。このため、圧力プロファイルには 2 つのガス、石油の圧力トレンド線、および共通 (単一) の水の圧力トレンド線が示される。
- 3) ケース III: プール A と B が、A の構造スピルポイントより浅い深度にて導通している場合、両プールは共通の OWC (プール A の構造スピルポイントに一致) を有する。また、本ケースは、GOC 深度が A と B におけるそれぞれのトップシール能力に規定される状況を想定している (図 14)。この状況は、導通路が両プールの GOC より深い深度に位置しているときに成立する。圧力プロファイル上では、それぞれ 1 つの石油および水の圧力トレンド線、また 2 つのガス圧力トレンド線が示され

図 11 層位封鎖型鉱床における貯留層の導通レベルの考察

チャネルによって区分されたプール A と B に掘削された坑井での産出流体 (●=石油, ●=ガス, ○=水) を示す。Well A では、坑井にて端面 (OWC) が観測されている。

図 12 モデルケース I: プール A と B は完全に隔離されている場合
右上は圧力プロファイル (切片ごとに上からガス, 油, 水) を示す (図 13 以下同じ)。

図 13 モデルケース II: プール B と C は完全に隔離され, プール A と B は A の構造的スリルポイントより下位で導通点を持っている場合

る。

- 4) ケース IV: 導通深度がケース III より浅い場合, 余剰のガスがプール A のトップシールからのみ漏出する可能性がある (図 15)。これは, プール B のトップシールからの漏出が始まる前に, 導通路を通じて余剰のガスが A へと流出すると想定されるためである。このような状況は, 導通深度がト

ップシール能力に規定される B の GOC (図 14 参照) よりも浅い場合に生ずると考えられる。プール A における GOC はトップシール能力に規定されるが, プール B の GOC は導通深度に一致する。また, 圧力プロファイル上では, それぞれ 1 つの石油および水の圧カレント線, また 2 つのガス圧カレント線が示される。

Pool A & B are Communicating
 "Cross Channel Spill-point" above OWC and below GOC in Pool A & B.
Fluids boundaries in Pool B
 OWC: Same level as OWC in Pool A
 GOC: Determined by the top seal capacity

図 14 モデルケースⅢ：プール B と C は完全に隔離され、プール A と B は A の構造的スリルポイントより上位で導通点を持っている場合

Pool A & B are Communicating
 "Cross Channel Spill-point" above OWC of Pool A and GOC of Pool B determined by the top seal capacity
Fluids boundaries in Pool B
 OWC: Same level as OWC in Pool A
 GOC: "Cross Channel Spill-point"

図 15 モデルケースⅣ：プール B と C は完全に隔離され、プール A と B は A の構造的スリルポイントよりさらに上位で導通点を持っている場合

- 5) ケース V: 導通路が、上記のケースⅣよりも上位、すなわちトップシール能力に規定されるプール A の GOC よりも浅い深度に位置する場合には、A および B プールは共通の OWC および GOC を有する (図 16)。このとき、OWC はプール A の構造スリルポイントに一致する。また、余剰のガスは A のトップシールからのみ漏出する。圧力プロファイ

ル上では、それぞれ 1 つのガス、石油および水の圧力トレンド線が示される。

I から V のモデルケースは、想定される各プール間の導通状況に応じた石油・ガスの分布を示したものである。プール間の導通性は、マッドフィルチャネルの地質に関連した側方シール性に大きく影響される。また、本来、流体境界面の推定は地層圧力データに基づくべきもので

図 16 モデルケースV：プールBとCは完全に隔離され、プールAとBはAのさらに上位のガスゾーン内で導通点を持っている場合

あるかもしれない。しかしながら、上記の考察はシールという観点からみた「ありうべき」状況を示すものであり、側方シール性や圧力プロファイルの妥当性をこうしたアプローチによって評価することは重要である。

6. ま と め

石油探鉱において、シール能力評価は埋蔵量だけではなく、石油・ガスの分布を推定するうえでも重要な項目の1つである。「等価粒径法」はキャピラリーシール理論に基づく従来の評価法に加えて、実際の石油・ガスコラム高からキャピラリー圧を逆推定すること、さらに等価粒径という指標を用いることで、より実際のシール能力の定量化を可能にした。ケーススタディとして紹介した例は、これまで主として地化学的な見地から検討されてきた石油とガスの分布が、シールという要素によっても規定される可能性を示したものである。このように、シール能力を定量的に評価することにより、石油探鉱に対して従来とは違った観点からのアプローチが拓かれることが期待される。

謝 辞

シンポジウムで発表する機会を与えていただいた石油技術協会、業務に際し得た知見の一部の使用許可をいただいたクライアントおよび地球科学総合研究所に厚くお礼申し上げます。また、本編は、そのほか日常的に議論をしている同僚、諸外国を含めた石油会社・機関の研

究者たちとの交流の賜物です。関連のあるすべての人々に心から感謝いたします。

引用文献

- Berg, R.R., 1975 : Capillary pressures in stratigraphic traps. *AAPG Bull.*, 59, 939-956.
- Catalan, L., Xiaowen, F., Chatzis, I. and Dullien, F.A., 1992 : An experimental study of secondary oil migration. *AAPG Bull.*, 76, 638-650.
- Dewhurst, D.N. and Henning, A.L., 2003 : Geochemical properties related to top seal leakage in the Carnarvon Basin, Northwest Shelf, Australia. *Australia Petroleum Geoscience*, 9, 255-263.
- Downey, M.W., 1994 : Hydrocarbon seal rocks. In Magoon, L.B. and Dow, W.G., eds. : *The petroleum system - from source to trap*, AAPG Memoir 60, 159-164.
- England, W.A., Mackenzie, A.S., Mann, D.M. and Quigley, T.M., 1987 : The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Journal of the Geological Society of London*, 144, 327-347.
- Gussow, W.C., 1954 : Differential entrapment of oil and gas: a fundamental. *AAPG Bull.*, 38, 816-853.
- Magoon, L. and Valin, Z.C., 1994 : Overview of petroleum system case studies. In Magoon, L.B. and Dow, W.G., eds. : *The petroleum system - from source to trap*, AAPG Memoir 60, 329-338.

- Nakayama, K. and Sato, D., 2002 : Prediction of sealing capacity by the equivalent grain size method. *In* Koestler, A.G. and Hunsdale, X., eds. : *Hydrocarbon seal quantification*, Norwegian Petroleum Society Special Publication 11, 51–60.
- Nakayama, K. and Van Siclen, D.C., 1981 : Simulation model for petroleum exploration. *AAPG Bull.*, **65**, 1230–1255.
- Sales, J.K., 1997 : Seal strength vs. trap closure – A fundamental control on the distribution of oil and gas. *In* Surdam, R.C., ed. : *Seals, traps, and the petroleum system*, AAPG Memoir 67, 57–83.
- Sawamura, F. and Nakayama, K., 2005 : Estimating the amount of oil and gas accumulation from top seal and trap geometry. *In* Sorkhabi, R. and Tsuji, Y., eds. : *Faults, fluid flow, and petroleum traps*, AAPG Memoir 85, 33–42.
- Schowalter, T.T., 1979 : Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bull.*, **63**, 723–760.
- Watts, N.L., 1987 : Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single- and two-phase hydrocarbon columns. *Marine and Petroleum Geology*, **4**, 274–307.