論 説

最近の石油システム評価技術

—シール解析技術から得られた新知見—*

高橋 利宏**・中山 一夫**・加藤 新**

(Received November 8, 2007 ; accepted January 11, 2008)

Petroleum system analysis — New knowledge from seal evaluation —

Toshihiro Takahashi, Kazuo Nakayama and Arata Kato

Abstract : In geologic time scale, flow of secondary migration of hydrocarbon is controlled by capillary (resistive) and buoyancy (driving) forces. The relationship between capillary threshold pressure of formation and buoyancy of hydrocarbons is considered as one of the most important aspects for petroleum system analysis. As high quality 3D seismic data is acquired in common, high resolution 3D basin simulation of capillary-dominated multi-phase flow regimes is the effective technique to realize the generation, migration and accumulation of hydrocarbons in reservoir scale. Two case studies are carried out to reveal the usefulness of 3D basin simulation in reservoir and new exploration ideas based on the seal evaluation. Case studies indicate that the invasion percolation for simulation algorithm enables to realize the migration pathways controlled by sand distribution, seal capacity and trap geometry. Working hypothesis of Matryoshka pressure model also enables that the reevaluation of the pressure data in discovered fields will produce some remaining exploration potential, even in mature fields and basins.

Key words : 3D basin simulation, hydrocarbon migration modeling, seal, buoyancy, capillary threshold pressure, static seal, invasion percolation

1. はじめに

石油システムとは熟成根源岩と油ガス集積が成立するために不可欠なすべての地質要素(熟成根源岩, 貯留岩, トラップ, シール)ならびに過程(炭化水素の生成・排出・移動・集積)を含むものである(Magoon & Dow, 1994)。石油システムという概念は新しい概念ではなく, 関連する地質要素と過程を考慮したイベント・チャートという簡便な手法で表現される。1980年代に登場した堆積盆モデリング技術は, 油ガスの生成・排出・移動・集積を再現する手法であり, 石油システムを評価するうえで非常に有効な手法である(奥井, 1998)。一方, トラップに集積する炭化水素の種類を規定する要素としてトラップ形態とシール能力の重要性が指摘されている(Sales, 1997)。

本稿ではシール評価技術を通して最近の石油システム評価技術とその適用例を紹介し, 評価過程で得られたシール・メカニズムに関する新知見について述べることを目的とし

ている。まずシールの概念を紹介し, 石油システム解析におけるシールの重要性について論じる。特にシールの捉え方に着目し, 「静的シール能力 (static seal)」と「動的シール能力 (dynamic seal)」を概説する。次に最近の石油システム評価技術として堆積盆シミュレーションの現状について紹介する。最後に探鉱が熟成した堆積盆において, シール解析技術という観点から石油システムを見直すことによって, 新しい探鉱対象の創出を目指した取り組みをケーススタディとして2件紹介する。

2. シール

石油システムの構成要素の1つであるシールは, 従来からその重要性が認識されており, “トラップ形態とトップシール能力の関係がトラップに集積する炭化水素の種類を規定する”という理論モデルが提唱されている(Sales, 1997)。流体移動モデルとシール能力の関係は, 異なる時間スケールで見ることにより違った性質を持ち, 「動的なシール」と「静的なシール」と呼ばれ区分されている。

2.1 玩具実験によるシールモデル

流体移動モデルを理解するため, プラスチック玩具を用いた実験を紹介する。実験に用いる玩具は円盤形をしており, 中は空洞で上面に穴が1つ, 下面には多数の穴が

*平成19年6月7日, 平成19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「熟成堆積盆における石油探鉱開発—新技術の適用—」で講演 This paper was presented at the 2007 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “New Approaches to Exploration & Exploitation in Mature Basins” held in Tokyo, Japan, on June 7, 2007.

**株式会社地球科学総合研究所 JGI Inc.

図1 玩具を用いたシール体感実験

開いている（図 1a & 1b）。まずこの円盤の下面を下にして水中へ沈めると上面の穴から空気の出しながら、中の空気は水に置換される。そしてそのまま空中へ持ち上げると、下面にあいた多数のすべての穴から水が流れ落ちていく（図 1c）。ところが、水が完全に無くなった状態となった後に、空中で上下を逆さまにして再度水に沈めると、最頂部にある 1 つの穴からだけ気泡が漏れていることがわかる。すなわち、他にも多数穴が開いているにも係らず、漏れるのは 1 ヶ所である（図 1d）。最頂部では浮力の最も大きく作用する一番シール力の弱いところにあたる。この現象は工学的時間スケールで見た「動的なシール」による流体移動現象と理解される。

玩具実験は空気と水の二相流システムで実施され、空気の浮力が穴の毛管スレッシュールド圧に打ち勝って最も通りやすい 1 点からだけ空気が漏れていく状況を再現した。もっと穴が小さい実際の頁岩によるシールを考えても、同様のことが起こると予測される。この実験では空気が地下でのガスにあたり、石油も密度が違うだけで同じ原理が働くことになる。そして、すなわち、シール能力評価においては、貯留層の天井を形成する頁岩層中の最もシール力の弱い部分を見つけ出さねばならない。コアやログなどの坑井源位置近傍（ミクロ的視点）からはそのような情報を得ることは至難の業である。これに対し、OWC レベルや圧力プロットなど遠く（マクロ的視点）からトラップを観察することによって、予測されるコラム高からシール能力を

逆算するような評価方法が用いられるべきである。

2.2 動的シールと静的シール

炭化水素の移動を貯留層モデルなどと同じく工学的時間スケールで見た場合、流体移動モデルを理解するためには「動的シール能力」として浸透率が重要である（Welte *et al.*, 2000）。炭化水素の二次移動がダルシーの法則に従うことを前提としたものである。その中でシール評価については、コアやカッティングスサンプルの分析データ（水銀圧入試験など）を基にシール層の孔径を求め、それに相当する浸透率に換算して動的シール能力の推定が行われている。このような限定された坑井試料を基に行われる評価手法は「ミクロ的手法」とも呼ばれる。

一方、炭化水素の移動を地質的時間スケールで見た場合、流体移動モデルを理解するためには「静的シール能力」として毛管スレッシュールド圧が重要である（Sales, 1997）。また油ガス田に集積した炭化水素の大部分は油とガスの二相流によって移動してきたことが明らかにされており、水濡れ（water wetting）であれば炭化水素は毛管スレッシュールド圧を越えた動力（浮力）が働かなければ動くことができない。油ガス田におけるシールがその能力の限界まで炭化水素コラムを保持している場合、貯留層中の炭化水素の浮力（ P_b : buoyancy pressure）とシール中の毛管スレッシュールド圧（ P_{th} : capillary threshold pressure）と平衡状態にある（Berg, 1975）。

$$P_{th} = 2 \times \gamma \times \cos \theta / R$$

$$P_b = g \times H_c \times (\rho_w - \rho_h)$$

γ : 界面張力, θ : 濡れ度, R : 孔隙のくびれ半径,
 g : 重力加速度, ρ_w : 地層水比重, ρ_h : 炭化水素比重,
 H_c : 最大炭化水素コラム高

上記の関係式から、油ガス田におけるシールの孔隙のくびれ径が分かれば、シール能力を推定することが可能である。さらにシール能力とトラップ形態（トラップの高さ）との関係を明らかにすることにより、トラップに集積する炭化水素タイプを予測することが可能である（図2）。しかしながら、くびれ径は埋没深度や構成粒子の大きさによって変化するため、これまで定量化が困難とされてきた。

近年、既存油ガス田の貯留層における炭化水素の集積状況とトラップ形態との関係からトップシール能力を逆算する方法が提唱されている（Nakayama & Sato, 2002; Sawamura & Nakayama, 2005）。このシール評価手法はフィールド全体からシール能力を推定する「マクロ的手法」であり、シール能力を「シール層の等価粒径」という概念で定量的に表現する「等価粒径法 (equivalent grain size method)」と呼ばれ、シール能力がシール層の毛管スレッシュョールド圧力によって決定されると仮定している。このシール層の毛管スレッシュョールド圧力はシール層の孔隙の関数によって表される（Nakayama & Van Sien, 1981）。ここで、シール層がすべて同じ径の球体粒から構成されていると仮定した場合、上述の孔隙はこの仮想径（等価粒径）と孔隙率に置換することができる。「等価粒径法」によるシール能力評価が、対象トラップの最大油ガスコラム高の推定のみならず、集積している炭化水素のタイプ（石油かガスか？）を予測する上でも、有用な評価手法となると期待され、実フィールドへの適用例が増加しつつある（澤村ほか, 2006）。

3. 堆積盆シミュレーション

1980年代に登場した堆積盆モデリング技術は、現在では油ガスの移動・集積の過程を堆積盆スケールで三次元的

に再現することを可能にするとともに、近年急速に発達したバイオマーカー評価技術とともに石油システムを評価する上で最も有効な手法である（奥井, 1998）。市販の堆積盆シミュレーション用ソフトは主にダルシー則法（Darcy's low method）、フロー・パス法（flowpath or ray tracing）ならびにインベーション・パーコレーション法（invasion percolation）と呼ばれる3つの流体移動モデルからなる（表1）。

既往の堆積盆モデリング技術の多くは、炭化水素の二次移動がダルシーの法則に従うことを前提としたものである。そのなかでシール評価については、コアやカッティングスサンプルの分析データ（水銀圧入試験など）を基にシール層の孔径を求め、それに相当する浸透率に換算して動的シール能力の推定が行われている。ダルシー則に基づく堆積盆シミュレーションは必要なすべての要素を含んでおり、非常に信頼性の高いシミュレーションを実行することが可能である。しかしながら、三次元シミュレーションを通常の計算機で実行する場合、処理時間が極めて長くなり、大きなモデルや高解像度のモデルのように100万セルあるいはそれ以上のモデルを取り扱うことは困難であっ

表1 商業ベースの主要堆積盆シミュレーション用ソフト一覧

Software name	Producer	Dimension	Phase	Modeling method
TemisPack & Temis3D	Beicip-Franlab, France	2D & 3D	3	Darcy's law
Basinmod	Platte River Associates, USA	2D & 3D	3	Darcy's law
Sigma2D & 3D	JNOC/TRC, Japan	2D & 3D	3	Darcy's law
Geopet	JGI, Japan	2D	3	Darcy's law
SEMI	Sintef Petroleum Research, Norway	2D & 3D	3	Ray tracing
PetroMod	IES GmbH, Germany	2D & 3D	3	Darcy's law Ray tracing Invasion percolation
MPath	Permedia Research Group, Canada	2D & 3D	3	Invasion percolation

図2 トップシール能力とトラップ形態の関係

た。またスケーリングを変更することによりセル数を減らすかモデルの解像度を下げなくてはならなかったため、単純化したモデルをもとにシミュレーションを実行するしかなかった (Welte *et al.*, 2000)。

フロー・パス法と呼ばれる手法は、二次移動が浮力のみに従うことを前提としたものである。これにより異常高压の生成や圧密による圧力変化など multi-dimensional effects を考慮していないという面もあるが、ダルシー・モデルと比べると解像度が高くかつ貯留層におけるより詳細な集積・スピル現象を再現することが可能となった。さらにハイブリッド法 (hybrid method) では、ダルシー則とフロー・パス法とを組み合わせることにより、モデルの解像度を下げることなく計算時間を大幅に短縮することに成功し、現在三次元堆積盆シミュレーションに適用されることが多くなりつつある。

一方、石油システムの構成要素の1つであるシールは、静的シール能力と呼ばれるシール層の毛管スレッシュホールド圧力をシール能力として仮定している。特に、二次移動がダルシーの法則ではなく、“炭化水素の浮力と地層の毛管スレッシュホールド圧の関係でのみ支配される”という考えを基にした炭化水素の移動・集積シミュレーションが普及しつつある。その中でもインベージョン・パーコレーション法と呼ばれる簡易アルゴリズムを用いた手法の特徴は、計算速度が速く (26 万セル / 5 秒)、詳細な地質モデルを用いた炭化水素の移動・集積を再現するとともに、地質モデルに内包される入力データの不確実性を評価することが可能になった (Carruthers, 1998 ; Carruthers & Ringrose, 1998)。このモデルでは、根源岩から排出された炭化水素が集積するなどして地層の毛管スレッシュホールド圧に達すると、周辺にある毛管スレッシュホールド圧の低いところへ移動していく (図 3)。地質学的時間スケールで見ると炭化水素の移動速度は極めて遅く、炭化水素の粘性の影響を無視することができるので、炭化水素の移動は浮力 (もしくは重力) と毛管スレッシュホールド圧の関係で決まる。浮力と砂岩と泥岩の単純な二次元断面モデル上での炭化水素の移動集積をシミュレートし、Sales (1997) の提唱する理論に一致する結果が得られた (図 4)。

近年、三次元地震探査が一般的に行われるようになったことで、堆積層や岩石物性の三次元的な広がりを貯留層スケールの高精度で推定することが可能となった。これに伴い、貯留層スケールの三次元堆積盆シミュレーションによる検討が可能となった。特に探鉱が熟成した堆積盆では、貯留層スケールでシミュレーションを行うことが極めて重要であり、探鉱余地の検討に極めて有用である。近年、インベージョン・パーコレーション法を用いた既存油ガス田周辺における適用例が増えつつある (例えば守屋ほか, 2007)。

4. ケーススタディ

ケーススタディとして東南アジア海域における既発見油ガス田およびその周辺地域を対象とした三次元堆積盆

図 3 Invasion percolation による移動・集積シミュレーションの方法

シミュレーション適用例ならびに圧力解析によるシール解析結果から得られたシールに関する新知見について紹介する。

4.1 ケーススタディ (その 1)

ひとつ目のケーススタディとして東南アジアにおける既発見油ガス田およびその周辺地域において、三次元地震探査データを用いて堆積層や岩石物性の三次元的な広がりを貯留層スケールで推定し、三次元堆積盆シミュレーターの1つである MPath (表 1 参照) を用いて貯留層スケールでの三次元堆積盆シミュレーションによる検討を行った。スタディ地域は南北 25 km、東西 20 km のエリアで、水深 200 m 以浅の浅海域に位置しており、これまでに 6 坑の試掘井が掘削され、中新統において複数のガス層が発見されている (図 5)。主要ガス層は A-B ホライゾンの間に集中しており、河川成から浅海成の砂岩層からなる (図 6)。各砂岩体の分布は極めて不均質で、単層の厚さ 20m 以下の薄層からなる (図 7)。

三次元地震探査データ (時間データ) を基に、貯留岩の発達する A-B ホライゾン区間の三次元岩相モデルの作成をオランダ dGB 社製ソフト・GDI (geology driven integration) を用いたアトリビュート解析によって作成した (Takahashi *et al.*, 2008a in press)。モデルの大きさは $938 \times 776 \times 201$ セルで、セルサイズは $25 \text{ m} \times 37.5 \text{ m} \times 4 \text{ ms}$ 、総セル数は $146.3\text{E} + 06$ である (Takahashi *et al.*, 2008b in press) (図 8, 図 9)。

砂岩ならびに泥岩の毛管スレッシュホールド圧はそれぞれ標準偏差 50 ならびに 500 の正規分布を仮定し、平均で 100 kPa と 10,000 kPa としてそれぞれ設定した (図 10)。スタディ地域内の深度変化は顕著でないため圧密による毛管スレッシュホールド圧の補正は実施していない。

根源岩からの炭化水素の生成・排出については、一次元モデルの生成・排出シミュレーション結果ではガスのみ排出されたことから、ガスのみ注入することとした。B ホ

図4 炭化水素の二次元断面上での移動・集積状況のシミュレート結果

図5 Z砂岩貯留層上限深度構造図

ライゾン直下に発達する層準がガス生成帯にあり、スタディ地域西部から西南部でガスの生成・排出が起っており、排出されたガスを1950 ms以深でかつ泥質部の発達するBホライゾンから30 msより深い層準から注入した(図11)。1回のシミュレーション計算に要した時間は約3時間、計20回実施した。シミュレーション結果を図12に示す。これらの結果は三次元地震探査データで捕らえられた貯留岩スケールの分解能で、炭化水素の移動・集積がシミュレー

図6 貯留層を南北に横切る地震探査時間断面図

トされたことを示している。

モデルの妥当性を検証するため坑井で確認されている既発見ガス層の分布を再現できているかどうかチェックを行った。その結果、坑井で確認されている油ガス層とシミュレーションによる油ガス集積状況の推定結果はほぼ一致し、良好な結果が得られたと考えられる(図13)。シミュレートされた各坑井におけるガスの集積予測から、坑井位置によってガスの集積状況が異なる傾向を示した。すなわち炭化水素のキッチンエリアの西側と南側に隣接するwell-1とwell-6では、炭化水素の移動経路が短く、最下位のBホライゾンの砂岩にのみガスの集積がシミュレートされている。一方、炭化水素のキッチンエリアから最も遠いwell-4では最上位のAホライゾン付近に分布する砂岩層にのみガスの集積がシミュレートされた。これらの坑

Takahashi et al., (2008a) in pressに加筆

図7 三次元堆積盆シミュレーション検討対象区間

Pth: 毛管シュレッシュヨールド圧 (capillary threshold pressure)
 Sigma: 各岩相で正規分布と想定した毛管シュレッシュヨールド圧の標準偏差 (standard deviation)
 Takahashi et al., (2008b) in pressに加筆

図10 岩相による毛管スレッシュヨールド圧の設定

井の中間に位置する坑井 (well-2, well-3, well-5) では Z 砂岩を中心に複数の砂岩層にガスの集積がシミュレートされた。以上のようなシミュレーション結果から、ガスの移動経路と砂岩層の分布がトラップにおけるガスの集積状況に大きな影響を与えていることが示唆される。ただし、Z 砂岩層にガス層が確認されている坑井 (well-2, well-3, well-5) のうち、well-2 ではシミュレーションによるガスの集積を再現することができていないことも明らかとなった。この原因としては砂岩層の三次元的な分布により、well-2 と同一の背斜構造でよりダウンディップ側に位置する well-3 まではガスが背斜構造の尾根部を移動し十分供給されたものの、よりアップディップ側の well-2 まではガスの移動が十分行われなかったことが推定される。

本スタディでは既発見油ガス層の再現だけではなく、未試掘のエリアについても複数の炭化水素の集積が期待され

るエリアを貯留層スケールで摘出することに成功した (図 14)。以上のような結果から、ガスの移動経路と砂岩層の分布を三次元的に把握するとともに、シール能力の観点から、貯留層スケールの三次元的シミュレーションを実施することにより、炭化水素の移動・集積状況を把握することが新規探鉱対象を摘出するために極めて重要である。

4.2 ケーススタディ (その2)

2つ目のケーススタディとして東南アジアにおける既発見油ガス田を対象とした圧力解析によって明らかとなった大水深域のシール特性について紹介する。対象地域は水深 1,000 m を超える大水深域であり、近年 4 億バレル級の油田が発見されたのを契機に、大油ガス田の発見が相次いでいる。同海域における油ガス田では北東-南西方向に延びる十数条のスラスト・シートの上盤 (hanging wall) に形成された背斜構造がトラップとなっており、中新統 / 鮮新統タービダイト成砂岩層を貯留岩とするものである。既存油ガス田の貯留層は異常高压層となっており、各貯留層は地層圧力が異なり、深度が深い貯留層ほど地層圧力が高くなる傾向が認められる。

圧力モデルを単純化するため、上下 2 枚の油層がシール層を挟んで存在する場合を例として考える。通常、各油層の地層圧力が異なる場合、それぞれの貯留層のトップシールが炭化水素を保持している。このようなシール特性を「独立モード (independent mode)」と呼ぶ (図 15a & 15b)。各油層のシール層が同じ岩相でシール能力も同じ場合、下位層ほどトップシールの深度が深くなることによって圧密が進行してシール能力が増す。このため下位層ほど集積できる炭化水素コラム高が高くなり、最上部の貯留層の炭化水素コラム高が最も低くなる。その結果、端面レベルは下位貯留層ほど深くなる。それぞれの貯留層のトップシールにおける圧力バランスは下記のようにあらわすことができる。

図8 シミュレーションに用いた数値モデル (砂岩率)

Takahashi et al., (2008a) in pressに加筆

図9 シミュレーションに用いた数値モデル (砂岩率) のホライゾン・スライス

Pth1 = Poil1 @ 上位貯留層

Pth2 = Poil2 @ 下位貯留層

Pth1: 上位貯留層のシールの毛管スレッショールド圧 (Poil1)

Poil1: 上位貯留層に集積した石油コラム (Hoil1) 分の浮力

Pth2: 下位貯留層のシールの毛管スレッショールド圧 (Poil2)

Poil2: 下位貯留層に集積した石油コラム (Hoil2) 分の浮力

一方、最上部のシール能力に比べて上下の油層間にあるシール層のシール能力が著しく低い場合には、上下層は同じ圧力コンパートメントとなり、最上部層のトップシール

Bホライゾンより30ms下のホライゾンで描いた時間構造図。この時間構造図上で1,950msより深いエリアをキッチンエリア(灰色着色部)と想定した。こうして想定したキッチンエリア面積の3%に相当するエリアに炭化水素のソースポイントを置いてシミュレーションを行った。

Takahashi et al., (2008b) in pressに加筆

図11 想定キッチンエリア

色の違いは個々の炭化水素集積を示す。

Takahashi et al., (2008b) in pressに加筆

図12 シミュレーションで推定されるZ砂岩層における炭化水素集積 (20回のうちの4回分を表示)

○ガスの集積が期待される未試掘エリア

Takahashi et al., (2008b) in pressに加筆

図14 ガスの集積が期待される未試掘エリア

が上下層すべての石油を保持する状況が生じる。すなわち、下位の貯留層ほど炭化水素コラム高が低くなり、貯留層間で地層圧力差がなく、端水面が同じ場合であり、「従属モード (dependent mode)」と呼ぶ (図 15c)。さらに貯留層圧力に差があり、かつ最上部の貯留層のトラップ内に完全に下位の貯留層が収まる集積状況を示している事例も認められた。このようなシール特性を「入れ子モード (matryoshka model)」と呼ぶ (図 15d)。各油ガス層の地層圧力が異な

図13 実坑井で確認されたガス層とシミュレーションから推定されたガス集積層準の比較

図15 地層圧力からみた独立モードと従属モードと入れ子モードの概念図

るものの、最上部の貯留層のトップシールが下位の貯留層の炭化水素をも保持している現象である、と理解される。「入れ子モード」は最上部の貯留層と下位貯留層のトップシール能力が極めて異なる場合に形成されと考えられる。それぞれの貯留層のトップシールにおける圧力バランスは下記のようにあらわすことができる。

$$P_{th1} = P_{oil1} \text{ @ 上位貯留層}$$

$$P_{th} = P_{th1} \text{ @ 上位貯留層}$$

$$= P_{oil2} + (\Delta P_w - \Delta P_{oil})$$

$$= P_{oil2} + \Delta P$$

P_{th} : トップシールの毛管スレッシュホールド圧

ΔP_w : 上下貯留層の水層間での圧力差

ΔP_{oil} : 上下貯留層の油層間での圧力差

ΔP : 上下部貯留層圧力差で生じる上方差圧力

スタディ地域で確認されているXフィールドの例は、この入れ子モード現象を示唆している(図16)。すなわち、

図 16 X フィールド模式断面図

上方にかかる差圧力分に相当する下部貯留層の石油コラムは小さくなる現象が起こる。X フィールドの場合には、上位貯留層のトップシール能力を等価粒径法によって推定すると 12.12phi という等価粒径が得られた。この数字は上位貯留層のシール能力が極めて高いことを示唆する (Sawamura & Nakayama, 2005)。一方、上位貯留層のトップシールが下位層の油ガス層も保持していると考えた場合、トップシールには下位層の油ガス集積によって発生する浮力だけでなく、上下部貯留層圧力差で生じる上方差圧力 (ΔP) がかかる。この場合の上方差圧力は下位層のキャップガス層が存在することから、上下貯留層の水層間での圧力差 (ΔP_w) から上下貯留層のガス層間での圧力差 (ΔP_{gas}) を差し引いた分となる。この圧力関係から上下貯留層を含めたシール能力を等価粒径法によって求めると、そのシール能力はほぼ 12 phi という値が得られ、上位貯留層だけのデータから求めたトップシール能力とほぼ同じ等価粒径が得られた。

スタディでは入れ子モードという仮説を既発見油田である Y フィールドにおいて適用を試みて、端水面レベルの推定を行った。現在までに Y フィールドならびに隣接構造における試掘井は、すべて構造頂部付近で集中的に掘削されており、端水面レベルは構造頂部のデータで推定されていた。シール特性を「入れ子モード」という観点から見ると、油ガスの集積状況から、最上部の貯留層のトップシールが下位の貯留層の炭化水素をも保持していることが推定される。その結果、未探鉱の油層がさらに構造の裾野にまで広がっている可能性が示唆されるとともに、今後ダウンディップにおける探鉱余地と埋蔵量増加の可能性とともに隣接構造への炭化水素の集積が期待されることが示唆された (図 17)。

以上のように、入れ子モードは作業仮説であるが、このようなシール能力の観点から油ガス田データを見直すことにより、新たな探鉱余地を創出することが可能となる。

5. ま と め

三次元堆積盆シミュレーションによって、Sales (1997) が提唱した理論モデルを貯留層スケールで再現することが可能になった。今後、探鉱が熟成した堆積盆や既発見油ガス田周辺においては、三次元地震探査データを十分活用したうえで貯留層分布を把握し、シール解析という観点から堆積盆シミュレーションを実施することによって新しい探鉱対象の創出が期待される。

また「入れ子モード」とは、各油ガス層の地層圧力が異なるものの、最上部の貯留層のトップシールが下位の貯留層の炭化水素をも保持している現象である、と理解される。「入れ子モード」は最上部の貯留層と下位貯留層のトップシール能力が極めて異なる場合に形成されと考えられる。今回評価事例として紹介したシール特性は新しい知見であるが、フィールドで認められる現象をトップシールの観点から解釈・推定した作業仮説である。しかし、シール特性を「入れ子モード」という作業仮説で考えると、試掘が構造頂部付近に集中している場合、通常の解釈では端水面レベルは過小評価される可能性があり、未探鉱の油ガス層がさらに構造のダウンディップ側にまで広がっている可能性を示唆するという意味で、きわめて重要な作業仮説である。

以上のように、シール解析という新しい観点から石油システムを解釈することによって、従来型の考え方では想像もできなかった全く新しい探鉱対象を見つけ出すことを可能にし、熟成堆積盆における探鉱に貢献できると考える。

謝 辞

シンポジウムで発表する機会を与えて頂いた石油技術協会、業務に際し得た成果ならびに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株式会社地球科学総合研究所に厚くお礼申し上げます。評価作業中には、株式会社地球科学総合研究所地質部の諸氏から多くの助言をいただきました。シン

図 17 新しいアイデアにもとづいて認識された Y フィールドにおける新規探鉱余地

ポジウム講演および本稿作成にあたっては、石油技術協会シンポジウム世話人ならびに査読者の方々には有益なご意見とご協力を賜りました。以上の方々に心より感謝いたします。

引用文献

- Berg, R.R., 1975 : Capillary pressure in stratigraphic traps. *AAPG Bull.*, **59**, 939–956.
- Carruthers, D., 1998 : Transport modeling of secondary oil migration using gradient-driven invasion percolation techniques. PhD thesis, Heriot-Watt University.
- Carruthers, D. and Ringrose, P., 1998 : Secondary oil migration : oil-rock contact volumes, flow behaviour and rates. In Parnell, J. eds. : *Dating and Duration of Fluid Flow and Fluid-Rock Interaction*, Geological Society London, Special Publication, 144, 205–220.
- Magoon, L. B. and Dow, W. G., eds., 1994 : The Petroleum System-From Source to Trap, AAPG Memoir 60, 655 p.
- 守屋俊治・山根照真・齋藤雄一・加藤 進・中山一夫, 2007 : 岩船沖油・ガス田のタービダイト砂岩への炭化水素移動・集積モデル, 石技誌, **72**, 89–97.
- 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 **11**, 51–60.
- Nakayama, K. and Van Siclen, D.C., 1981 : Simulation model for petroleum exploration : *AAPG Bull.*, **65**, 1230–1255.
- 奥井 明彦, 1998 : ベースンモデリングによる石油システム評価, 石技誌, **63**, 78–91.
- Sales, J. K., 1997 : Seal strength vs. trap closure - a fundamental control on the distribution of oil and gas. In Surdam, R. C., eds. : *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 Y. Tsuji, eds. : *Faults, Fluid Flow, and Petroleum Traps*, AAPG Memoir 85, 33–42.
- 澤村史了・中山一夫・高橋利宏, 2006 : 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-, 石技誌, **71**, 107–118.
- Takahashi, T., Hou, J., Kato, A., Jaroonsitha, S. and Nakayama, K., 2008a in press : Detection of 3D distribution of reservoir sand bodies by ANN-A Case Study in the North Malay Basin (1) -. *Programme of Papers & Abstracts, Posters, PGCE 2008*. Geological Society of Malaysia.
- Takahashi, T., Kato, A., Jaroonsitha, S., Hou, J. and Nakayama, K., 2008b in press : 3D Basin Simulation controlled by Capillary Threshold Pressure-A Case Study in the North Malay Basin (2) -. *Programme of Papers & Abstracts, Posters, PGCE 2008*. Geological Society of Malaysia.
- Welte, D.H., Hantschel, T., Wygrala, B. P., Weissenburger, K. S. and Carruthers, D., 2000 : Aspects of petroleum migration modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, **69–70**, 711–714.