用語解説「石油システム」

奥井 明彦*

A commentary on “petroleum system”

Akihiko Okui*

はじめに

地下における油・ガス田の成立には2つの側面がある。1つは油・ガスを貯めておく器（岩石）が存在することであり、もう1つはその中に十分な油・ガス（流体）が満たされていることである。この2つの条件が備わって初めて油・ガス田が成立する。これら2つの条件には自然界の様々な要素や過程が関わっている（図1）。例えば器に関しては、構造、シール（両方を合わせてトラップということもある）や貯留岩という要素の存在が必要である。また油・ガスに関しては、根源岩という要素が存在し、さらに生成、移動、集積（シーリング）という過程が起こらなくてはならない。そこで油・ガスの発見確率を向上させるためには、これらを全ての要素や過程を精度良く評価することが不可欠となる。

しかし現実にはデータ取得の容易さや評価技術の進歩の程度によって必ずしもこれら要素や過程が適切に評価されてきたとは言えない。例えば石油探鉱ではビジネスとして成り立つために重要な経済性、つまり埋蔵量の観点から、伝統的に油・ガスを貯めておく器（岩石）の評価に力点が置かれてきた。またこの点は物理探査技術の進歩によって、器の大きさが精度良く評価できるようになってきたことも大きく貢献していると考えられる。これに対して幾ら大きな器があっても中味（油・ガス）が入っていないければ意味がないという指摘も昔からなされてきた（Dow, 1974; Demaison, 1984）。しかし油・ガスを生んだ根源岩は概して堆積盆地の中心部の深部に存在していることが多く、特に探鉱の初期にはそのよ

うな場所にまで坑井が掘削されることは余りなかった。従って以前は評価に必要なデータや情報が得られ難かった。またそのような直接的な情報が得られない場合に適切に評価する技術が確立されていなかったことも、石油探鉱屋の目を油・ガスを貯めておく器（岩石）の評価に向けさせた一因であると考えられる。

しかし近年バイオマーカー（Waples and Machihara, 1991; Peters and Moldowan, 1993）やベースンモデリング（Dore et al., 1993; Duppenbecker and Iliffe, 1998）等の新技術の発展により、トラップに供給された油・ガス（流体）を精度良く評価することが可能となってきた。石油公団石油開発技術センターでも昭和62年度から開始された大型研究「原油・根源岩対比技術」においてこれら技術の研究を行って来た（例えば石油公団, 1996）。

「石油システム（Petroleum System）」という概念は、油・ガス田の存在を従来より重視されてこなかったその中味である油・ガス（流体）という側面から理解しようという考え方であり、そういう意味では全く新しい概念ではない。バイオマーカーやベースンモデリング等の新しい技術の発展によって、以前は困難であった探鉱の初期や直接的な情報が得られない場合にでも適切な評価が可能になってきたことを踏まえ、今まで指摘されてきたトラップが油・ガスで満たされる条件や油・ガスを供給するシステムに関する考え方を整理し、それら最新技術を用いて簡便に評価する手法を提唱した点が新しいと考えられる（Magoon and Dow, 1994）。

*石油公団石油開発技術センター地質・地化学研究室
Geology and Geochemistry Laboratory, Technology
Research Center, Japan National Oil Corporation, 1-2-2,
Hamada, Mihama-ku, Chiba, 261-0025, Japan

図1 油田を成立させる要素と過程.

Magoon and Dow (1994) の石油システム 及びその評価法

Magoon and Dow (1994) は、石油システムを「A petroleum system is defined here as a natural system that encompasses a pod of active source rock and all related oil and gas and which includes all the geologic elements and processes that are essential if a hydrocarbon accumulation is to exist.」と定義している。つまり現象的には（熟成した）根源岩とそれらに関連した油・ガスを含んでいる自然の系であり、それは同時に油・ガスの集積が存在するために不可欠な全ての地質的要素や過程をも含んでいるとしている。これは前に述べた「中味がなくてはならない」ということそのもので、全く新しい概念ではない。むしろ彼らの石油システム論で新しいのは、このことを評価する簡便的な手法を提唱した点にある。Magoon and Dow (1994) は石油システムを評価する簡便法として以下の4つのツールを組み合わせた。つまり、1) キッチンエリア及びトラップを含むマップ（図2）、2) キッチンエリアからトラップに至る地質断面図（図3）、3) キッチンエリアでの埋没曲線（図4）、4) 関連する現象の時期を示すイベント・チャート

（図5）である。尚、キッチンエリアとは、石油が作られている場所のことであり、料理が作られる台所にたとえている。

これらを組み合わせた具体的な評価方法としては、まず1) のマップ上に既に発見されている油・ガスを書き込む作業から始める。発見されている油・ガスは、実際に生産されている油・ガス田、小さな集積から地表にしみ出したシープに至るまでを書き込む。この際バイオマーカーや同位体組成上の特徴から油・ガスが幾つかのグループに分けられることがあり、その場合には異なる石油システムに属するファミリーとして書き込む。

次にそれら油・ガスを供給した可能性のあるキッチンエリアを書き込む。キッチンエリアの条件としては、能力のある根源岩の存在とそれが熟成していることが必要であり、この条件を満たしているエリアを Magoon and Dow (1994) は“Pod of Active Source Rock”と呼んでいる。根源岩の存在は多くの場合その堆積盆地の進化史を理解した上で、盆地縁辺部で得られる坑井や露頭試料の地化学分析結果に基づき全域へ外挿することにより評価せざるを得ないのが現状である。また熟成している必要性から2) の地質断面や3) の埋没曲線を用いて、根源岩が深く埋没しているエリアを見いだす。さらにより

図2 キッチンエリア及びトラップを含むマップ。Magoon and Dow (1994) から抜粋。

厳密に“Pod of Active Source Rock”の存在するエリアを知るためには、3)の埋没履歴を入力データとして熟成モデリング(1次元ベースンモデリング)を行う。この場合その“Pod of Active Source Rock”の熟成時期も合わせて評価される。そして一つの石油システムが働いた時期を明確にするために、4)のイベント・チャートを用いて“Pod of Active Source Rock”の熟成時期と各要素の活動時期の関係を整理する。石油システムが働いたとはこれら要素の過程した時期が適切であった結果であり、Magoon and Dow (1994)はこの時期を“Critical Moment”と呼んでいる。

最後にマップ上に存在する油・ガスと“Pod of Active Source Rock”を対応させ、それらの組み合わせを一つの石油システムと認定し、対応付けられた一つのシステムの広がり(Geographic Extent of Petroleum System)」を評価する。この際1)のマップや2)の地質断面を用いて油・ガスと“Pod of

Active Source Rock”の位置関係を整理し、各地層の形状や断層やフラクチャーの存在を勘案して、2次移動を評価することになる。例えば“Pod of Active Source Rock”が存在しているエリアで断層が発達している場合には、生成された油・ガスはこれらに沿ってまず垂直に移動し、次に貯留岩になり得る浸透性の良い層準に遭遇したらその層準に沿って側方に移動しトラップに至ると考える。そしてこの場合貯留岩相当層のマップにおいて等深度線に直角な方向に線を引き2次移動の方向とする。“Pod of Active Source Rock”の両端から油・ガスの分布域に向かって引かれるこれら法線で囲まれる地域を“Geographic Extent of Petroleum System”とする(図2, ドレイネージ・エリアとも言う)。対応付けには直接的にバイオマーカーや同位体組成により油やガスと根源岩の対比を行う方法も有効で、分けられたそれぞれの油・ガスのファミリーに対して上のような2次移動の解析を行う。尚、厳密的にはこの

図3 キッチンエリアからトラップに至る地質断面図。Magoon and Dow (1994) から抜粋。

図4 キッチンエリアでの埋没曲線。Magoon and Dow (1994) から抜粋。

図5 関連する現象の時期を示すイベント・チャート. Magoon and Dow (1994) から抜粋.

図6 ベースンモデリングによる石油システム評価の例. 石油公団が開発した SIGMA-2D によるノルウェー領北海でのシミュレーション結果, 白黒が各地層の油飽和率, コンターラインが温度, 矢印が油の移動方向と速度

評価に用いるマップは“Critical Moment”のマップとなる。

Magoon and Dow (1994) はこのような方法により確定されたものを石油システムあるいは石油システムの広がりと呼んでおり、例えば根源岩と対比されない油・ガスは広がりに加えられない。この定義方法を用いれば、ある石油システムの広がり内部に新しく摘出されるトラップには油・ガスが集積している可能性が高く、その外側に存在するトラップには集積の可能性が低いと評価される。このMagoon and Dow (1994) の評価法は、簡便に行なえることが一つの目的であることから、その根底に原則となる作業仮説が置かれている。例えば“Critical Moment”については根源岩の熟成がトラップ形成以後でなければ時期が合わない、2次移動は主に浮力による、“Geographic Extent of Petroleum System”については現在見つかっている油・ガスの分布で評価する等である。根源岩の熟成がトラップ形成の時期以降でなければならぬのは、油・ガスの移動が地質時間スケールで非常に迅速であると考えているためで、実際にはトラップが形成された以後に油・ガスがトラップに到達すれば時期の問題はない。また油・ガスの移動は流体動力学（ハイドロダイナミクス）、浮力、毛細管圧力等様々な圧力の合計が大きいところから小さいところに流れるのであって、従って場合によっては下方への移動や構造の高いところを乗り越えてさらに移動することも起こりうる。Magoon and Dow (1994) の評価法では簡便化のため、これら例外より原則的な仮説を強調している傾向がある。

以上のように Magoon and Dow (1994) の評価法は、石油システムが動的であることを認めながらもその方法は静的（アナログ的）であるといえる。これに対し動的なシステムを動的に評価しようというのが以下に述べる2（多）次元ベースンモデリング技術であり、Magoon and Dow (1994) の簡便法より精度良く石油システムを直接的に評価できる可能性があると考えられる。また近年石油探鉱においてその対象が小規模・複雑・難地域化しており、そのため原則にとらわれない新しい発想によるプレイの発掘が求められているが、2（多）次元ベースンモデリング技術はそのようなプレイの評価に最も適切なツールの一つであると考えられる。

ベースンモデリング

ベースンモデリングとは、文字通りベースン（堆積盆地）をモデリング（模する）技術である。従来の地質学のアプローチでは、各露頭、坑井や堆積盆地から得られる現象や事実を解析し一般的な法則や理論を導き出す帰納的な方法を採用していた。これに対してベースンモデリングでは、まず一般的な法則や理論を組み立ててそれらが個々の露頭、坑井や堆積盆地に見られる現象や事実を説明できるかどうかによって、最初に立てた法則や理論を立証しその精度を向上させていく演繹的な方法を採用している。演繹的な方法は自然科学において広く用いられているが、石油地質では熟成度の予測等に端を発し、有機地球科学による根源岩の評価で採用された演繹的な方法を特にベースンモデリングと呼ぶようになった。根源岩の熟成度予測を行う場合、実際に試料が入手できればビトリナイト反射率等により評価が可能であるが、一般に熟成している根源岩は堆積盆地の中心部深くにあり石油探鉱でそこまで掘り込むことは余りなく、そのため演繹的な方法が必要となったと考えられる。

初期のベースンモデリングはロパティン・ウェイブルズ法（Waples, 1980）に見られるように簡単手計算によって行われていたが、コンピューター技術の発達とともに複雑な計算が可能となり、ベースンモデリングがコンピューターシミュレーションによって行われるようになった。さらに堆積盆地全体の熱状況を地殻熱流量の伝導で表し、個々の根源岩の埋没履歴を圧密補正により求め適用することにより、根源岩の熟史がより詳細に評価されるようになった。また反応速度論に基づき油・ガス生成反応がモデル化された（Tissot and Welte, 1978）。この結果、熟成度の予測法は堆積盆地のある位置での油・ガスの生成を評価する1次元ベースンモデリングに進化した。

この方法をさらに地質断面に拡張し、さらに有効圧力の概念を適用した地層圧力や異常高圧層のモデル、またダルシーの法則による流体移動のモデルを取り込み、堆積盆地のある断面における油・ガスの生成・移動・集積を評価する2次元ベースンモデリングが開発された（Nakayama and Van Sicken, 1981; Welte and Yukler, 1981; Ungerer et al., 1984）。従って2次元ベースンモデリングは有機地球科学の領域に留まらず、広く地質やエンジニアリ

ングの知識や技術を包有・統合した大きなシステムへと進化した。現在ワークステーションの発達とともに、この2次元ベースンモデリングは、世界的に石油探鉱におけるルーチ的な評価方法として定着しつつある。また前に述べたように、石油公団石油開発技術センターでも昭和62年度から開始された大型研究「原油・根源岩対比技術」において石油の生成・移動・集積に関する研究を行い、その成果を取り込み2次元3相流ベースンモデル「SIGMA-2D (2-Dimensional Simulator for the Integration of Generation, Migration and Accumulation)」を開発している(奥井, 1991, 1995, 1998; Okui et al., 1996)。プロトタイプ開発後この技術やSIGMA-2Dの有効性・妥当性や限界を認識するために実際の堆積盆地に適用したケーススタディを実施しており、約30の盆地での適用例がある(Okui et al., 1994, 1997)。さらにこの方法を3次元領域に拡張し、構造運動をも取り込んで油・ガスの集積量を定量的に評価できる3次元ベースンモデリングの開発が世界的に行われている(石油公団, 1997)。

文 献

- Demaison, G., 1984: The generative basin concept. *AAPG Memoir 35 "Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation"*, 1-14.
- Dore, A.G., Augustson, J.H., Hermanrud, C., Stewart, D.J. and Sylta, O., 1993: Basin Modelling: Advances and Applications. Elsevier, 675.
- Dow, W.G., 1974: Application of oil correlation and source rock data to exploration in Williston basin. *AAPG Bull.*, 58(7), 1253-1262.
- Duppenbecker, S.J. and Iliffe, J., 1998: The Application of Basin Modelling Techniques to Hydrocarbon Exploration: What Have We Learnt?. *The Geological Society Special Publication*, in press.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994: The petroleum system. *AAPG Memoir 60 "The Petroleum System-from Source to Trap"*, 3-24.
- Nakayama, K. and Van Siclen, D.C., 1981: Simulation model for petroleum exploration. *AAPG Bull.*, 65, 1230-1255.
- 奥井明彦, 1991: 「堆積盆評価システム」の概要—大型研究「原油・根源岩対比技術」における「堆積盆地評価システムの開発」(その2)—。石油の開発と備蓄, 24(4), 105-134.
- 奥井明彦, 1995: SIGMA-2Dによる堆積盆評価。石油の開発と備蓄, 28(4), 93-105.
- 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。石油技術協会誌, 63(1), 78-91.
- Okui, A., Hara, M. and Matsubayashi, H. 1994: The analysis of secondary migration by two-dimensional basin model "SIGMA-2D" (abstract). *1994 AAPG Annual Convention Official Program*, 227-228.
- Okui, A., Hara, M., Fu, H. and Takayama, K. 1996: SIGMA-2D: A simulator for the integration of generation, migration, and accumulation of oil and gas. *Proceedings of VIIIth International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 365-368.
- Okui, A., Imayoshi, A. and Tsuji, K. 1997: Petroleum system in the Khmer Trough, Cambodia. *Proceedings of An International Conference on "Petroleum Systems of S.E. Asia and Australasia"*, 913-921.
- Peters, K.E. and Moldowan, J.M., 1993: The Biomarker Guide. Prentice Hall, 363.
- 石油公団, 1996: 大型研究「原油・根源岩対比技術」。平成7年度石油開発技術センター年報, 54-107.
- 石油公団, 1997: 大型研究「三次元堆積盆地解析システム技術」。平成8年度石油開発技術センター年報, 49-115.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1978: Petroleum Formation and Occurrence. Springer-Verlag, 538.
- Tissot, B., Pelet, R. and Ungerer, P., 1987. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices and kinetics of oil and gas generation. *AAPG Bull.*, 71, 1445-1466.
- Ungerer, P., Bessis, F., Chenet, P.Y., Durand, B., Nogaret, E., Chiarelli, A. Oudin, J.L. and Perrin, J.F., 1984: Geological and geochemical models in oil exploration; Principles and practical examples. *AAPG Memoir 35 "Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation"*, 53-78.

- Waples, D.W., 1980: Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration. *AAPG Bull.*, **64**, 916-926.
- Waples, D.W. and Machihara, T., 1991: Biomarkers for Geologists. *AAPG Methods in Exploration Series*, **9**, 91.
- Welte, D.H. and Yukler, M.A., 1981: Petroleum origin and accumulation in basin evolution-A quantitative model-. *AAPG Bull.*, **65**, 1387-1396.