論 文

一次元堆積盆地シミュレータを用いた熱史と削剥量の推定*

稲 場 土誌典**

(Received August 4, 1997; accepted November 26, 1997)

Quantitative estimations of the heat-flow history and erosion
using a one-dimensional maturity simulator

Toshinori Inaba

Abstract: Numerical basin modeling simulators have been widely applied to petroleum exploration in recent years. Based on the observation and interpretation of the objective sedimentary basin, a geological conceptual model is constructed. The conceptual model is converted into input data for the simulator. When simulated results are consistent with the observation, the simulation is considered to be pertinent. The objective of the present study is to discuss the effects of heat-flow history and erosion on the vitrinite reflectance simulated by the one-dimensional maturity simulator "MATOIL®".

Recent and great changes in heat-flow history can be detected easily. Measured vitrinite reflectance scatters even at the same maturity level. Quantitative estimation of the heat-flow history is restricted by the reflectance scatter. Particular attention should be paid to the fact that different heat-flow histories by which almost the same present reflectance is simulated may provide different reflectance evolutions.

An unconformity was observed between the Lower Oligocene and the Pleistocene to Pliocene (?) in the Well MITI Goto-nada. At the depth of the unconformity, vitrinite reflectance does not change significantly. Based on the reflectance simulation, the eroded sediment is estimated to be thinner than the present deposit on the unconformity.

The present study shows that there may be plural conceptual models which give the simulated results consistent with the present observation, however, these conceptual models may show different maturation and petroleum generation histories. From the viewpoint of petroleum exploration, the numerical simulation should be attempted repeatedly using possible conceptual models.

Key words: numerical basin modeling simulator, one-dimensional maturity simulator, quantitative estimation, MATOIL®, conceptual model, vitrinite reflectance, heat-flow history, unconformity, erosion, Well MITI Goto-nada

*平成9年6月5日, 平成9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「石油探鉱に果たすシミュレーションの役割」で講演 This paper was presented at the 1997 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Applications of simulation modeling to hydrocarbon exploration" held in Makuhari, Chiba, Japan, June 5, 1997.

**帝国石油(株)技術研究所 Teikoku Oil Co., Ltd., Technical Research Center

1. はじめに

堆積盆地シミュレータ (以後, 単にシミュレータと称する) は, 堆積盆地の中で地質時代にわたって生ずる種々の現象を総合的にシミュレートするソフトウェアの総称である。石油探鉱に利用されるシミュレータは, これらの現象を通して石油鉱床の形成に関係する現象を取り扱う。

シミュレータを適用する場合には, 最初に対象とする

堆積盆地を多角的に観察して、堆積盆地の概念的な地質モデルを組み立てる。一般にこれを概念モデルと称する。堆積盆地の観察は、岩相や層序、岩石の物性、地下や堆積時の表層の温度、貯留岩や根源岩としての性質などの面から行われる。堆積盆地の観察や考察の結果は、シミュレータに入力可能なデータ（通常は数値データ）として整理される。シミュレータはこれらのデータを用い、シミュレータに規定されているデータの処理規則に従ってシミュレーションを実行する。この処理規則はシミュレータのコンセプト（概念）とも呼ばれ、堆積物の埋没に伴う孔隙率の変化を評価する Athy の式や、クロジェン濃度による一次反応式での石油生成量の評価が例として挙げられる。シミュレーションの結果から推定された現在の状態が実際の堆積盆地で観察された状態と調和的である場合には、堆積盆地の概念モデルには矛盾がなく、それに基づくシミュレーションも妥当と判断されて、シミュレーション結果が石油鉱床の形成に関する予測に利用される。一方、シミュレーションで推定された現在の状態が実際に観察される状態と調和しない場合には、概念モデルに問題があるとされ、概念モデルの見直しの後に改めてシミュレーションが試みられる。

近年のシミュレータに関する研究の中心は、高次元多相流シミュレータの開発や応用、およびその他の機能強化へと移行してきた。このような方向性は、シミュレータが適切に利用される限り望ましいものと言える。しかし、いかに優れたシミュレータが開発されても、シミュレーションの原点となる概念モデルに問題があればシミュレーション結果は意味を失う。一次元堆積盆地シミュレータを用いた地殻熱流量履歴と削剥量の推定を通し、概念モデルの重要性を考えた。

2. 方 法

堆積盆地の観察や考察を通して組み立てられる概念モデルの個々の構成要素は、評価や解釈が比較的容易な事象と、それが困難な事象とに分けられる。定量的な評価が困難な事象の中から、地殻熱流量の履歴と不整合に伴う削剥量に着目して検討した。

この検討に使用したシミュレータは、IFP (Institut Français du Pétrole) が開発した一次元シミュレータ MATOIL® version 3.0.5 (1994年リリース) である。シミュレータは、経時変化を追跡する対象空間軸の数によって、一次元、二次元、三次元に分けられる。一次元は最も簡便なシミュレータで、平面上のある点において生ずる現象の深度方向の変化、すなわち坑井で観察される現象の経時変化をシミュレートする。

一次元のシミュレータから得られるシミュレーション

結果の中で、熟成度は重要な位置を占めている。この論文では、シミュレートされる熟成度指標の中からビットリナイト反射率に着目した。

3. 結 果

3.1 地殻熱流量履歴の影響

一般に堆積盆地の地下から伝わる熱は主として伝導によって移動しており、このとき地温勾配は次式によって地殻熱流量にほぼ比例する。地殻熱流量は、シミュレータで地下の熱的条件を規定する場合には最もよく用いられる。

$$\text{地殻熱流量 cal/(cm}^2\cdot\text{s)}$$

$$= \text{地温勾配 } ^\circ\text{C/cm} \times \text{熱伝導率 cal/(cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C)}$$

地殻熱流量の検討には、単純化した仮想の地質条件を持つ坑井（表1）を用いた。この坑井で、まず地質時代を通して地殻熱流量を1.0 HFU (=1.0 $\mu\text{cal}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) で一定とする履歴を設け、これを基準条件とした。これに対し、時代 P と地殻熱流量 Q を用いた単純な地殻熱流量履歴のパターン（図1）を設定し、 Q の初期値を

表1 地殻熱流量履歴を検討するための仮想坑井のシミュレーション条件

層 序	150Ma から現在 (0Ma) まで
岩 相	泥岩100%
堆 積 速 度	100m/100万年で一定
圧密支配則	$1/\phi = 0.002857 \times z + 1/0.70$ ϕ : 孔隙率, z : 深度 m
岩石マトリックス物性	熱伝導率 4.54 mcal/(cm $\cdot$ s $\cdot$ °C) 比熱容量 0.55 cal/(cm 3 $\cdot$ °C)
地層水物性	熱伝導率 2.03 mcal/(cm $\cdot$ s $\cdot$ °C) 比熱容量 1.00 cal/(cm 3 $\cdot$ °C)
表層温度	10°Cで一定

図1 仮想坑井の地殻熱流量履歴

2.0 HFU から 0.5 HFU までの範囲とし、 P を 150 Ma から 0 Ma まで変化させた。基準条件と P と Q で設定した地殻熱流量履歴とでビトリナイト反射率をシミュレートし、その結果を比較した。

シミュレートされたビトリナイト反射率を同じ深度で比較すると、その差は深度が深くなるほど拡大した。そこで同じ深度でのビトリナイト反射率の相違を単に差で求めるのではなく、次式によってすべての深度で相対的な差を計算し、その最大値（以後、最大相対差と称する）と P と Q との関係を考察した。

$$\text{相対的なビトリナイト反射率の差} = |R - R_s| / R_s$$

R : 時代 P と地殻熱流量 Q を与えた地殻熱流量履歴（図 1）でシミュレートしたビトリナイト反射率

R_s : 基準条件の地殻熱流量履歴でシミュレートしたビトリナイト反射率

与えた地質条件でシミュレートされたビトリナイト反射率の対数値の深度プロットは直線にならず、ビトリナイト反射率が 1% から 1.6% の間で深度に対するビトリナイト反射率の増加率が高い。このため最大相対差は、通常はこの反射率を示す深度の間に認められた。最大相対差と時代 P や地殻熱流量 Q によって与えられる地殻熱流量履歴との関係を図 2 に示す。

基準条件と比較して、 $Q > 1$ HFU では高いビトリナイト反射率の値が、 $Q < 1$ HFU では低いビトリナイト反射率の値がシミュレートされた。同じ初期の地殻熱流量 Q で比較すると、時代 P が新しいほど最大相対差が大きくなる。同じ時代 P で比較すると、初期の地殻熱流量 Q と基準条件である 1.0 HFU との差が大きいのほど最大相対差が大きくなる。ビトリナイト反射率を用いて地殻熱流量履歴を推定する場合には、現在の地層温度を満足する地殻熱流量（これで一定とする履歴を与えることが

図 2 地殻熱流量履歴とシミュレートされたビトリナイト反射率の相対的な差の最大

多い) でシミュレートされる値を、まず実測値と比較する。ここで差が認められることによって、現在とは異なる地殻熱流量が過去に存在したことを予測できる。基準条件でのシミュレーション結果を実測値に置き換えて考えると、最大相対差を大きくするような地殻熱流量履歴のほうが予測が容易と言える。

一方、ビトリナイト反射率の測定値は、同じ熟成レベルの試料においてもある程度の幅を持つと言われている（平井，1979）。堆積に時間的な不連続性がない坑井でも、ビトリナイト反射率の測定値と深度との間に直線的で単純な関係が求められない場合がある。実際には、ビトリナイト反射率の微小な変化が地殻熱流量の変化に対応すると判定することは困難であり、ビトリナイト反射率を用いた地殻熱流量履歴の推定には限界があると言える。例えば、ビトリナイト反射率の測定値 0.5% に対して 0.4% から 0.6% までの測定値の幅を許容すると、図 2 で相対的なビトリナイト反射率の差が 20% までの範囲の地殻熱流量の変化は、その推定が困難と言える。

また、図 2 は最大相対差が類似するような異なる地殻熱流量履歴が存在することを示す。例えば表 2 に掲げた 3 つの地殻熱流量履歴は、最大相対差が 58% でほぼ等しい（図 2）。これらの地殻熱流量履歴でシミュレートされた現在のビトリナイト反射率は、どの深度でもほぼ一致した（図 3）。

MATOIL® は最初に石油生成率をシミュレートし、その結果をビトリナイト反射率に変換するので、石油の生成が顕著ではない深度約 1,200 m 以浅ではビトリナイト反射率がシミュレートされない。この深度はほぼ 26 Ma 以降の層準に相当しており、ビトリナイト反射率がシミュレートできれば、この層準には地殻熱流量履歴を反映した相違が現れる可能性がある。ただし、この深度では相対的に被熱温度が低く被熱時間も短いので、ビトリナイト反射率の相違は微小と考えられる。

図 3 のシミュレーション結果は、地殻熱流量履歴のパターンに対する概念モデルの制約がなければ、図 3 に現れたビトリナイト反射率の測定値に対して表 2 の中からの地殻熱流量履歴を採用してもよいことを意味する。

表 2 相対的なビトリナイト反射率の差の最大が等しい 3 つの地殻熱流量履歴の例

No.	地殻熱流量履歴		ビトリナイト反射率の相対的な差の最大%
	P Ma	Q HFU	
1	75	2.0	58
2	45	1.5	58
3	0	1.25	58

ここで、最下位層準（現在深度約5,360 m）でシミュレートされたビトリナイト反射率の履歴を、表2の地殻熱流量履歴の間で比較した（図4）。シミュレートされた現在のビトリナイト反射率はほぼ一致するものの、地

殻熱流量履歴の相違によって現在に至るビトリナイト反射率の進化履歴が異なり、熟成の時期に差が現れた。このような根源岩の熟成時期の相違は、石油の移動経路や集積構造の形成時期との相互関係によって探鉱のブレイやプロスペクトの評価に影響を与える可能性がある。根源岩からの石油の生成タイミングを考察する場合には、概念モデルが許容するさまざまな地殻熱流量の履歴を考慮すべきと考える。

3.2 不整合に伴う削剥量の影響

ビトリナイト反射率は有機物熟成度の指標として広く用いられており、温度と時間の作用によって不可逆的に上昇する。大きな不整合が存在する坑井では、ビトリナイト反射率に不連続性が期待される（平井, 1979）。

基礎試錐「五島灘」は、国の第8次国内石油・天然ガス基礎調査5カ年計画の一環として、長崎県野母崎の沖合約32 km、水深124 mの海上で、平成8年6月5日から8月7日まで掘削された（石油公団, 1998；図5）。この試錐では深度3,041 mまで掘削され、更新統から晩新統(?)～白亜系(?)（この試錐の下部には著しく変質した火山岩類が認められて、時代は未詳である）までを探鉱した。

この試錐の層序、音波走行時間、ビトリナイト反射率を図6に示す。この試錐では石灰質ナノ化石その他が示す不連続性から、深度1,494 mにおいて、西彼杵層群下部～松島層群崎戸層（下部漸新統）と口之津層群相当層（更新統～鮮新統(?)）とを画する不整合を認めた。石灰質ナノ化石の分帯では、西彼杵層群下部～松島層群崎戸層ではNP21帯（Berggren *et al.* (1995) では上

図3 相対的なビトリナイト反射率の差の最大が等しい3つの地殻熱流量履歴でシミュレートした現在のビトリナイト反射率

図4 相対的なビトリナイト反射率の差の最大が等しい3つの地殻熱流量履歴でシミュレートしたビトリナイト反射率の進化履歴

図5 基礎試錐「五島灘」の試錐位置

限が約32.8 Ma)を、口之津層群相当層(上部鮮新統)ではNN16帯(Berggren *et al.* (1995)では下限が3.7 Ma)を確認したことから、この不整合に伴う時間間隙は約2,900万年に達すると推定された。しかし、音波走行時間の不連続性はそれほど明瞭ではなく、ビトリナイト反射率でも顕著な不連続性は見いだされなかった。

そこで、不整合面において音波走行時間に不連続性を認めない地質モデルと不連続性を認める地質モデルをそれぞれ作り、シミュレータを用いておのこの地質モデルで現在のビトリナイト反射率を満足する地殻熱流量の履歴を推定した。不連続性を認めない地質モデルでは、不整合に伴う削剥量を現在の不整合より上位の堆積物の層厚1,370 mよりも薄い1,000 mと仮定した。不連続性を認める地質モデルでは、音波走行時間を参考に削剥量を2,000 mと仮定した。なお、岩相層序や表層温度履歴などのデータにはこの試錐の観察結果(図7)を適用し、岩石および地層水の物性データにはシミュレータのデフォルト値(IFP, 1992)を用いた。

それぞれの地質モデルにおいて、測定されたビトリナイト反射率にできるだけ近いシミュレーション結果が得られるように調整した地殻熱流量の履歴と、シミュレートされたビトリナイト反射率を図8に示す。音波走行時間に不連続性を認めない地質モデル(削剥量1,000 m)では、測定されたビトリナイト反射率にはほぼ調和するシ

ミュレーション結果が得られた(図8実線)。音波走行時間に不連続性を認める地質モデル(削剥量2,000 m)では、シミュレートされたビトリナイト反射率の深度に対する増加率が測定値よりも低く、測定値と調和的なシミュレーション結果は得られなかった(図8点線)。この結果から、この不整合に伴う削剥量は音波走行時間に顕著な不連続性を認める程度ではないと推定できる。

不整合面で音波走行時間に不連続性を認めない地質モデルから求めた地殻熱流量の履歴(図8実線)を用い、不整合面での削剥量と不整合面の直下、すなわち西彼杵層群下部～松島層群崎戸層の最上部付近のビトリナイト反射率との関係をシミュレータで求めた(図9上)。削剥量を増加させると、シミュレートされた不整合直下のビトリナイト反射率は上昇した。これは不整合面を境としたビトリナイト反射率の不連続性が拡大したことを意味する。特に削剥量が1,200 m付近を超えると、不連続性の拡大は顕著になった。

この試錐位置での堆積期は漸新世までと鮮新世以降の2期に分かれており、その時期に埋没に伴って地層温度が上昇し、熟成が進行したと考えられる。不整合面での削剥量、不整合面直下の西彼杵層群下部～松島層群崎戸層の最上部付近における現在の温度、および削剥開始時の一時的なピーク温度との関係をシミュレータで求めた(図9下)。削剥量と現在の温度はほとんど関係しない

図6 基礎試錐「五島灘」の層序、音波走行時間およびビトリナイト反射率

地層またはイベント	開始時代 Ma	下限深度 m *	削剥量 m **	岩 相 %				表層温度 ℃	
				砂岩	シルト岩	頁岩	石炭	10	15
更新統	2.0	766		30	60	10			
上部鮮新統	3.7	1170		20	80				
下部鮮新統	5.3	1370		70	30				
不整合	23.8		1000 または 2000						
上部漸新統 (削剥)	32.8		-1000 または -2000	35	35	20	10		
下部漸新統	34.2	1705		35	35	20	10		
上部始新統	36.9	2013		20	60	20			

* 下限深度では、水深 124m を差し引いている。

** 削剥量では、削剥量を正、堆積量を負で表す。

図7 基礎試錐「五島灘」のシミュレーション条件

が、削剥量の増加に伴って削剥開始時の一時的なピーク温度は上昇した。これら2つの温度の高低は削剥量が約1,200m 付近で逆転しており、この削剥量あたりからビトリナイト反射率の上昇が顕著になった(図9上)。削剥量が約1,200m 以内では現在が最高被熱温度であり、約1,200m を超えると削剥開始時が最高被熱温度であることから、ビトリナイト反射率の上昇には最高被熱付近

の温度が深く関与していると判断された(例えば、Hood *et al.*, 1975; 関口・平井, 1980)。この検討では漸新世までと鮮新世以降の両方の堆積期に同じ熱的条件を仮定しているので、最高被熱温度を最大埋没深度に置き換えることができる。

この試錐では、不整合面におけるビトリナイト反射率測定値の不連続性は0.1%にも満たない(図8)。この不

整合面ではビトリナイト反射率の不連続性が0.1%以上でないと不連続として認識されないと仮定すると、不整合に伴う削剥量は0mから約1,400mまでの範囲と推定

図8 基礎試錐「五島灘」で求めた地殻熱流量履歴とシミュレートされたビトリナイト反射率

された。この検討では削剥量にはこれ以上は言及できなかったが、1,000mを超える削剥の有無は、この地域の集積構造の形成時期や石油の移動方向の評価に影響を与える可能性がある。この試錐では石油の生成に十分な熟成度には達していないが、根源岩が熟成している場合には根源岩の熟成時期の評価にも影響を及ぼす。このような点からすると、削剥量に対しても地殻熱流量履歴の場合と同様に、概念モデルが許容しうるさまざまな削剥量を考慮して検討すべきと考える。

4. 考 察

シミュレータを用いて検討を行うとき、シミュレーションの結果から推定された現在の状態が実際の堆積盆地で観察された状態と調和的である場合には、概念モデルには矛盾がないと判定され、シミュレーション結果が石油探鉱での予測に利用される。しかし、地殻熱流量履歴や削剥量の例で明らかなように、実際の観察結果と調和的なシミュレーション結果を与えるような概念モデルが複数存在する可能性がある。さらにそれらの概念モデルでは、シミュレートされる現在の状態は一致しても現在に至る履歴には相違がある場合も考えられる。このような点からすると、観察結果とシミュレーション結果が調和する場合にもほかに考えられる概念モデルを適用して、さまざまな視点から広範な予測を試みることが重要と考える(図10)。シミュレータは反復試行を得意とする。シミュレータがもたらす成果はシミュレータの利用

図9 基礎試錐「五島灘」における下部漸新統と更新統～鮮新統(?)を画する不整合に伴う削剥量と、不整合直下のビトリナイト反射率、現在の地層温度、および削剥開始時の一時的なピーク温度との関係

図10 堆積盆地シミュレータを用いた検討の流れ

方法と適用する概念モデルに負うところが大きく、シミュレーションの原点となる概念モデルが極めて重要である。

5. ま と め

- (1) 石油探鉱に堆積盆地シミュレータを用いる場合には、堆積盆地の観察に基づいて構築される地質的な概念モデルが重要である。
- (2) 一次元の堆積盆地シミュレータ MATOIL®を用い、入力する地殻熱流量履歴と不整合に伴う削剥量がシミュレートされるビトリナイト反射率に与える影響を、仮想の地質条件と基礎試錐「五島灘」でそれぞれ検討した。
- (3) シミュレーション結果には、最近の時代の地殻熱流量の変化や規模の大きな地殻熱流量の変化が強く影響した。同じ熟成レベルの試料でもビトリナイト反射率の測定値にはある程度の幅があることを考慮すると、ビトリナイト反射率を用いた地殻熱流量履歴の推定には限界があると言える。
- (4) 異なる地殻熱流量履歴でシミュレートされるビトリナイト反射率では、現在に至る履歴は異なっても現在のビトリナイト反射率は一致する場合がある。あるビトリナイト反射率の実測値に対し、それに至

るいくつかの履歴を想定できることがある。

- (5) 基礎試錐「五島灘」では、下部漸新統と更新統～鮮新統(?)を画する不整合が認められた。ビトリナイト反射率にはこの不整合面を境とした顕著な不連続性が見られなかったことから、堆積期に均一の熱的条件を仮定すると、不整合に伴う削剥量は0mから約1,400m(ほぼ現在の堆積量)までの範囲と推定された。
- (6) 地殻熱流量履歴と削剥量の検討から、観察結果と調和的なシミュレーション結果を与え、しかも現在に至る履歴は異なる複数の概念モデルが存在する可能性が示唆された。石油探鉱では、考えられるさまざまな概念モデルを用いて広範に検討することが重要と考える。

謝 辞

通商産業省資源エネルギー庁および石油公団には基礎試錐「五島灘」の資料の公表を、帝国石油株式会社にはこの論文の公表を許可していただきました。これをまとめるに当たり、石油公団地質調査部松林英樹調査役ならびに帝国石油株式会社の関係諸氏に貴重なご意見やご助言をいただきました。ここに深く感謝します。

引 用 文 献

- Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, C. C., III and Aubry, M.-P., 1995: A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In Berggren, W. A., et al. ed.: *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM Special Publication No. 54, 129-212, SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- 平井明夫, 1979: ビトリナイト反射率. 石技誌, 44, 190-195.
- Hood, A., Gutjahr, C. C. M. and Heacock, R. L., 1975: Organic metamorphism and the generation of petroleum. *AAPG Bull.*, 59, 986-996.
- Institut Français du Pétrole (IFP), 1992: MATOIL® reference manual version 3.0.
- 関口嘉一・平井明夫, 1980: 有機物熟成度の予測. 石技誌, 45, 353-361.
- 石油公団, 1998: 平成8年度国内石油・天然ガス基礎調査, 基礎試錐「五島灘」調査報告書.