

解 説

地質・探鉱部門シンポジウム

「石油探鉱・開発における貯留岩性状の予測技術」

まとめ—貯留岩分布予測に向けて*

立石雅昭**

(Received December 26, 2000; accepted January 12, 2001)

Summary of the Symposium "Technology for prediction of reservoir distribution and property in petroleum exploration and development"
—Geological modeling for prediction of distribution of reservoir rock

Masaaki Tateishi

Abstract: Geological modeling is a process comparing many cases and extracting most general ones from various factors that caused complicated geological phenomena. Geological phenomena are highly effected by local factors such as tectonic situation, basinal and provenance topography, and climate. Therefore, the creation of geological model need to distinguish general and important factors from complicated and various factors. However, an actual distribution of reservoir rocks in an objective basin is considerably controlled by the local factors. The geological modeling for prediction of distribution of reservoir rocks need to recognize general and local factors and discuss the role of them respectively.

Key words: Geological model, reservoir rocks, tectonic framework, basin architecture

1. はじめに

石油探鉱のリスク軽減のために、貯留岩の分布を予測する手法と技術を開発し、高めることが求められている。そして、その具体的な予測のために地質モデルを試行錯誤的に確立していく努力がさまざまな探鉱段階で進められてきた。

本シンポジウムでは貯留岩として基盤のフラクチュア、炭酸塩岩、火山岩、および砂岩が扱われた。ここで扱われた貯留岩分布に関する具体的な地質モデルは多様なスケール、性状を有しており、それらをまとめて今後の方向を検討することは容易ではない。ここでは貯留岩分布予測モデルを確立していく上で共通して検討されるべき以下の3つの課題について概説する。ひとつは地質モデルを組み立てる過程とその役割を改めて確認すること、第2に、地質モデルの階層性という問題、第3は貯留岩形成過程における堆積盆の枠組みと外的要因に関する考察である。堆積盆の枠組みについては石油探鉱の過程でデータの蓄積されてきた信越堆積盆を例に紹介する。

堆積相モデルを中心にこうした諸点について論述したWalker (1992) をあらためて参照していただきたい。

* 平成12年5月24日、平成12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・開発における貯留岩性状の予測技術」のまとめ This summary was presented at the 2000 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Technology for prediction of reservoir distribution and property in petroleum exploration and development", held in Niigata, Japan, May 24, 2000.

** 新潟大学理学部地質科学教室 Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University.

2. 地質モデルの提唱過程とモデルの役割

堆積相モデルは、特定の堆積環境での堆積物に関する多くの事象例から、その環境における堆積物の層相と分布について共通する重要な要素を抽出し、形成・発展過程とその時空的広がりを一般化したものである。ある地質事象の現出にはこうした一般性・普遍性ととも地域性や特殊な条件下での影響が反映している。例えば、タービダイト砂岩貯留岩をターゲットとしてその分布を予測する上で、タービダイトに関する多くの事例の中からこれら地域的な影響や特殊な条件をいかに捨象し、普遍性の高いモデルを創出するかということがまず第一義的に重要であろう。事例には現世ならびに地質時代の広範な例が含まれる。しかし、同時に具体的なフィールドにおいて特定の性状を持った相の時空的分布の解明には、その地域の固有の条件がどう影響するか、を検討しなければならない。

ここに述べたことは自明の理である。しかし、物理的、化学的事象に比し、さらには、生物的事象に比してさえ、地質事象においては地域的な条件が相対的重要性を持っている。したがって、ケーススタディーに基づく地質モデルという際、どの要素が普遍性を有するかを明らかにするには多くの事例を解析することが求められる。

一方、数少ない事例の解析、場合によれば、一事例の解析であっても、ある地域における特定の性状、例えば良好な貯留岩性状をもたらす本質的な要素を抽出し、それら本質的な要素の相互のかかわりでもって対象とする性状の概念的な時空分布を説明する「モデル」が提案されている。本シンポジウムで報告された地質モデルは基本的にはこうした個々のケーススタディーをもとにした「モデル」の提唱である。

Walker (1992) はモデルについて次の4つの役割を解説している。1) 新しい例を比較検討する際の基準 (Norm, for comparison), 2) 新しい例を観察する際の枠組み (guide for future observation), 3) 新しい地域における予測 (predictions in new area), 4) 解釈の基礎 (basis for interpretation) である。とくに彼は第3の役割を強調するとともに、モデルは新しい事例の解析の中でより洗練されるものであることを強調している。

本シンポジウムで報告された分布予測「モデル」は、それぞれの地域における特定の岩相に関して、貯留岩としての性状を規制する要素をさまざまな解析法を用いて明らかにしたものである。そのモデルの有用性と限界を正しく、特に地域性を反映した部分を取捨し、普遍的要素

を厳密に検討することが必要である。今後さらに事例研究を意識的に増やし、その有用性を試し、洗練していくことが求められるであろう。ところで、貯留岩性状という点に注目して、その性状についての時空分布を推定する上では、地域的にもしくは特殊な条件が大きな影響を与える場合も多い。この点では普遍的要素と特殊な要素を明確に意識した考察が必要だと考えられる。

3. 地質モデルの階層性

地質事象に限らず、すべての事象には階層性が存在する。それぞれの階層は固有の要素をもって運動しつつ、それぞれの階層の間には質と量とのかかわりで連関が認められる。普通、こうした階層性は無意識的に認識されているが、とりわけモデルを創造し、検証する上で重要な視点であり、意識的に検討されるべきものであろう。

貯留岩の分布を予測する上でもことは全く同じである。

石油システム (Demaison and Huizinga, 1991, 1994) の成立には根源岩の熟成、炭化水素の排出と移動、トラップの形成という三要素が不可分の条件であるが、本シンポジウムで力点を置かれた貯留岩分布を予測し、探鉱リスクを軽減するという課題を検討するうえでは階層性の認識はいかなる役割を果たすであろうか。より小さな階層においてはその運動を規制する要素は相対的に単純であるが、それらが集合して構成する大きな階層では要素は複雑となる (Walker, 1992)。地層で言えば、単層、部層、累層といった階層を考えればその違いは歴然である。また、扱う対象が時空的広がりにおいて同規模としても、その構成岩石 (例えば、火山岩と砂岩) が異なれば、当然その広がりをもたらす要素の階層も異なる。

貯留岩の分布を予測する地質モデルを考究する際、時間的・空間的スケールをよく考えて、その対象としている階層の現象を規制する要素と、その上下階層を規制する要素とのかかわりを吟味しなければならない。

4. 堆積盆の構造的枠組みと外的要因

石油探鉱に際しては対象とする堆積盆の構造的枠組み (tectonic framework) の把握が第一義的に重要である。

ある堆積盆の地質発達史を規制する最も重要な要素は地球内部の熱エネルギーに起因する地殻表層部におけるプレート群の相対的運動の質と量である。今日、堆積盆は、プレート境界の相対的運動の違いを基準に、Dickinson (1974) によって提案された分類が一般に広く認

表1 プレートテクトニクスに関連づけた堆積盆の区分 (Selley, 1998)

Selley (1976) の体系			Halbouty <i>et al.</i> (1970), Klemme (1975, 1980) の体系
安定地塊に伴う盾状地	堆積盆	盾状地内 盾状地外縁	タイプ I 単純な皿状の内陸堆積盆 タイプ II 大陸間複合前縁陸棚堆積盆
収斂プレート境界での 地向斜	舟状海盆	劣地向斜 優地向斜 モラッセ	タイプ VI 山間堆積盆 タイプ IV 大陸外縁下方撓曲堆積盆 タイプ VII 山間堆積盆
横ずれプレート境界	リフト堆積盆	走向移動	タイプ III リフト堆積盆
拡散プレート境界での リフトー漂移		山間 (後造山時)	
		海洋縁辺堆積盆 (大陸縁辺下方撓曲)	タイプ V 沿岸地溝プルアパート堆積盆 タイプ VIII 新生界デルタ

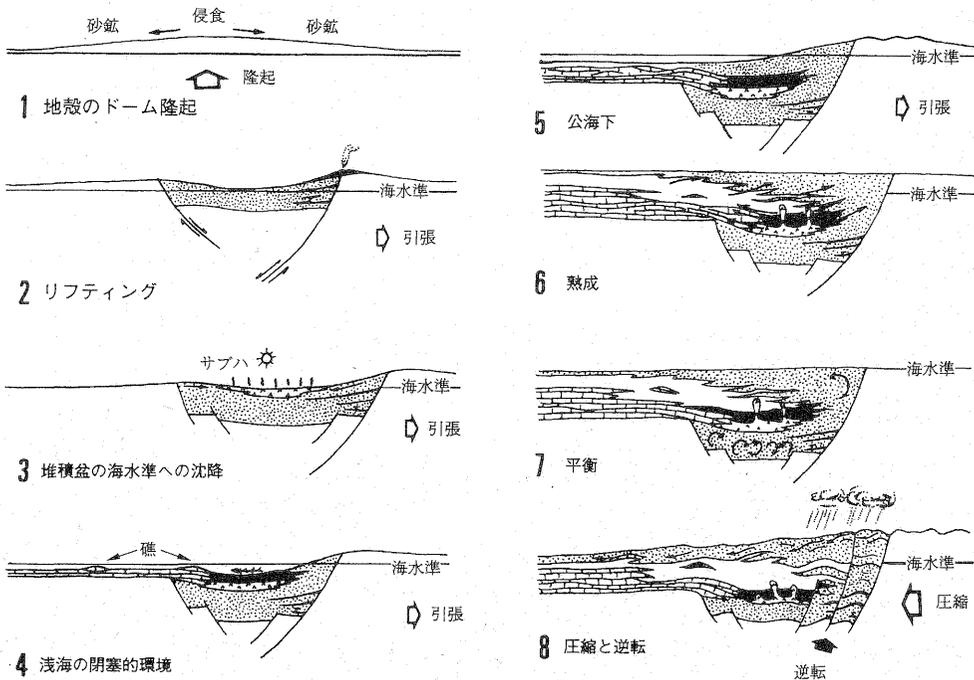


図1 非対称リフト堆積盆の形成と発展の概念図 (Selley, 2000)

1. 地殻のドーム状隆起 (あらゆる所で見られるわけではない); 2. リフティング (陸成層堆積, 火山活動による金属鉱床の形成); 3. 堆積盆底の海水面高度への沈降 (乾燥気候下では蒸発残留岩が形成され, 金属が濃集。地下水が流動。湿潤気候下では蒸発岩は欠如し, 湿地が炭層を形成); 4. 浅海の閉塞的環境 (有機物に富んだ泥が堆積。隣接する陸棚では石灰岩が堆積); 5. 公海環境 (粗粒碎屑物が泥を覆って埋積。隣接する陸棚では石灰岩が堆積); 6. 熟成 (泥岩は圧密され, 加圧された石油は有機物に富む頁岩から移動。岩塩ドームができ, 石油をトラップ。金属に富む蒸発塩水は隣接する石灰岩中に硫化物鉱床を形成); 7. 平衡 (間隙水圧は静水圧下にあるが, 深部の対流は火山性もしくは蒸発岩起源から熱水鉱床を形成, 表層では砂鉱や残留鉱床を形成); 8. 圧縮と逆転 (石油や金属に富む流体が再移動。天水は流体力学的な石油トラップを生み出す)

められている。Selley (1975) と Klemme (1980) の分類は表 1 のように対応づけられる (Selley, 1998)。堆積盆の発展史は順序だった構造時相を呈し、結果的に一連の堆積相の時空分布を生起する。堆積盆における一連のできごとと堆積相を認定することは石油システムの理解に欠かせない。Selley (2000) は、この一連の構造時相と関連した堆積相の時空的分布がリフト堆積盆に典型的に見られるとし、熱帯乾燥地域におけるリフト堆積盆を例に、その発展過程の中での石油システムの位置づけを解説している (図 1, 2)。そこでは貯留岩は主に初期のリフティング時において堆積する陸成層と、堆積盆の発展期である沈降期に閉塞ないし公海における海成碎屑物として形成されるとしている。この堆積盆の形成と発展の具体的な過程は日本においては藤田 (1990, など) の火山性隆起一陥没説としてモデル化されてきた概念と共通するものである。

一般的概念として、こうした堆積盆形成・発展過程の構造的枠組みの重要性は認識されても、実際にはそうした枠組みの中で貯留岩がどのような分布をとるかは、後背地の運動を含む堆積盆の構造 (basinal architecture) がモデル化されねばならない。

具体的に石油探鉱に基づく地質学的データの蓄積されてきた信越堆積盆を例にして、堆積盆の構造を概観す

る。図 3 は鈴木 (1989), Takano (1997MS) を参考にして作成した新生界信越堆積盆の構造である。そこでは三条一弥彦の新生界火山岩類からなる高まりを挟んでその南北の堆積盆はその構造を異にする。南部では北信につながる広大な堆積盆が広がるが、その中央部に北東-南西方向の高まりが想定される。碎屑物は南西からデルタや陸棚環境を経て、半深海のトラフに運ばれるとともに、狭い陸棚を経て側方、すなわち南東や北西からも供給される。他方、北部の堆積盆は西を佐渡海嶺に阻まれた狭長な堆積盆である。碎屑物は主に東から狭い陸棚を経て半深海トラフに運搬される。

一方、この堆積盆の構造を時空的にとらえた場合、堆積盆発展期初期の引張応力場における堆積盆拡大期と、堆積盆発展期末から造構運動時にかけての圧縮応力場における堆積盆の収縮・埋積期とでは、堆積盆の構造自体が変化するという認識が重要である (立石ほか, 1992)。特に南部の堆積盆では北北東-南南西に延びたいくつかの構造的高まりが堆積盆を分化させ、構造的凹地にトラフ充填タービダイトが堆積したものと推定される。北部では圧縮応力の影響が弱く、ほとんどその構造は前期と変わらなかったものと考えられる。

堆積盆の自立的発展様式のなかで、堆積システムに重要な影響を与えると考えられるのが外的要因としての海

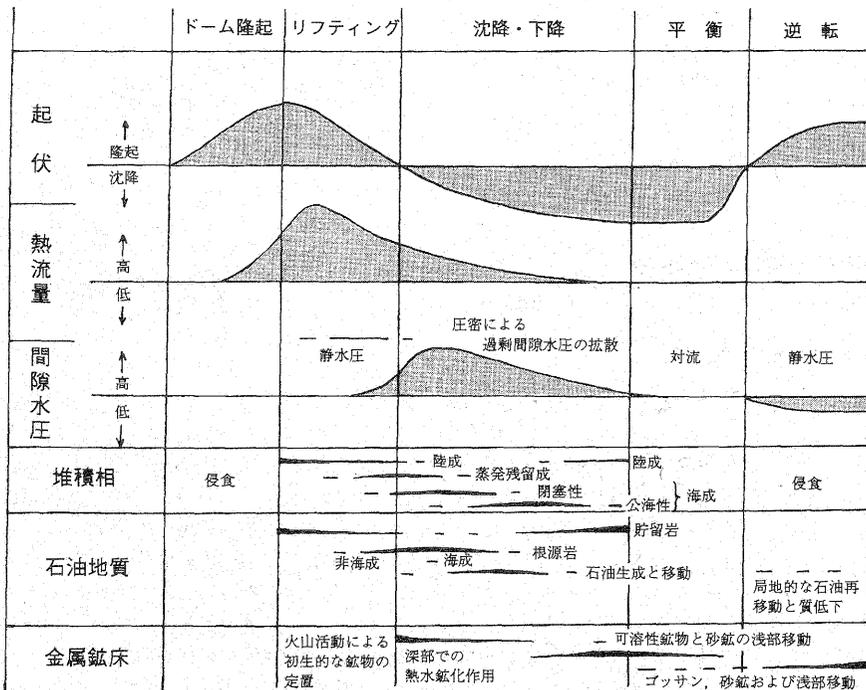


図 2 非対称リフト堆積盆における地質構造、堆積作用、鉱床ならびに石油生成過程 (Selley, 2000)

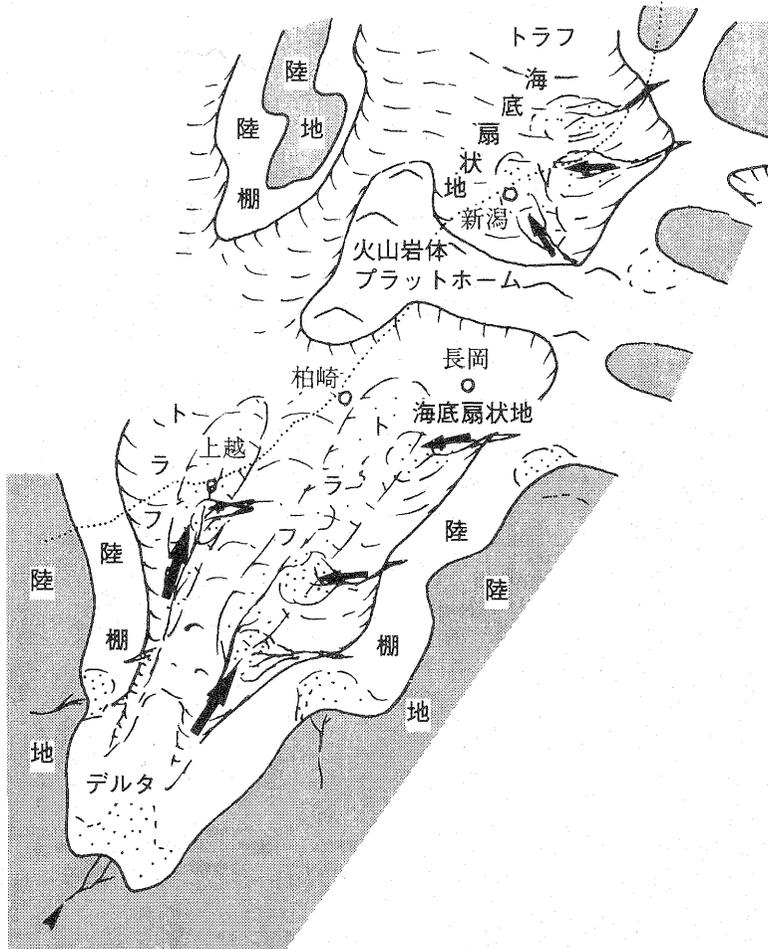


図3 北部フォッサマグナ信越堆積盆の構造

水準変動である。特にある堆積環境の堆積相モデルを考究するに際して、海水準の変動のステージに応じて記録される地層としての特性が異なるという認識が必要であろう。一般に70年代から80年代にかけての堆積相モデルではこうした面が十分に考慮されていなかったが、地層の形成過程に関するシーケンス層序学の進展の中で、堆積相モデル自体にも海水準変動のステージに応じた変化もモデルに組み入れる努力が重ねられている (Walker, 1992)。

5. まとめ

内在的な発展様式のモデル化と、それに大きく影響する外的要因の時間的変化の中で、対象とする貯留岩として良好な性状が時空的にどのように分布するかを明らかにする上で、ここに検討した諸点は以下のようにまとめられる。

1) 一般的にモデルは多くの事例を比較研究する中で

その事象をもたらす普遍的要素を抽出したものである。地質事象においては特に地域的要素が大きな影響を与えることから、モデル創出のためには普遍的要素を見極めることが重要であり、提唱したモデルをさらなる事例研究の中で洗練していくことが必要である。

2) 地質事象には階層性がある。対象としている貯留岩の階層を見極めることが必要である。また、時空的スケールとともに、上下位、特に下位の階層における要素と、対象としている階層における要素との関わり合いの検討が求められる。

3) 堆積盆の構造的枠組みとその発展史の中で、対象とする事象の位置づけを明確にする努力が求められる。貯留岩性状の時空的分布を規制する要素の中で、堆積盆全体の構造的枠組みや堆積盆の構造の歴史の変遷を考慮して、モデルに組み入れることが重要である。

引用文献

- Demaison, G. and Huizinga, H. J., 1991: Genetic classification of petroleum systems. *AAPG Bull.*, **75**, 1626-1643.
- Demaison, G. and Huizinga, H. J., 1994: Genetic classification of petroleum systems using three factors: charge, migration and entrapment. *AAPG Mem.*, **60**, 73-92.
- Dickinson, W. R., 1974: Plate tectonics and sedimentation. In Dickinson, W. R., ed.: *Tectonics and sedimentation*, SEPM Spec. Pub., **22**, 1-27.
- 藤田至則, 1990: 日本列島の成立(新版): 環太平洋変動. 築地書館, 259p., 東京.
- Halbouty, M. T., Meyerhoff, A. A., King, R. E., Dott. R. H., Klemme, H. D. and Shabad, T., 1970: World's giant oil and gas fields, geologic factors affecting their formation and basin classification. *AAPG Mem.*, **14**, 502-555.
- Klemme, H. D., 1975: Geothermal gradients, heat flow, and hydrocarbon recovery. In Fischer, A. F. and Judson, S., eds.: *Petroleum and global tectonics*, 251-306, Princeton University Press, Princeton.
- Klemme, H. D., 1980: Petroleum basins-classification and characteristics. *J. Petrol. Geol.*, **3**, 187-207.
- Selley, R. C., 1976: *An introduction to sedimentology*. Academic Press, 408p., London.
- Selley, R. C., 1998: *Elements of petroleum geology* (2nd ed.). Academic Press, 470p., San Diego.
- Selley, R. C., 2000: *Applied sedimentology* (2nd ed.). Academic Press, 523p., San Diego.
- 鈴木宇耕, 1989: 日本海東部新第三系堆積盆地の地質. 地質学論集, **32**, 143-183.
- Takano, O., 1997 MS: Depositional systems and controlling factors on sedimentation in the Northern Fossa Magna Basin, central Japan. 新潟大学大学院自然科学研究科博士論文.
- 立石雅昭・柿崎 聡・高野 修・東 将士・杉山和稔・遠藤正孝, 1992: 堆積相と構造運動—北部フォッサマグナ頸城—小谷地域のタービダイト堆積盆—. 地質学論集, **37**, 249-259.
- Walker, R. G., 1992: Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In Walker, R. G. and James, N. P., eds.: *Facies models - Response to sea level change*, 1-14, Geol. Assoc. Canada.