総 説

陸成層における堆積シーケンスの認定

—研究の現状と今後の課題—

高 野 修*

(Received June 1, 2000 ; accepted November 17, 2000)

Recognition of depositional sequences in terrestrial strata
—a review of developments in terrestrial sequence stratigraphy—

Osamu Takano

Abstract: Not a few papers concerning terrestrial sequence stratigraphy have been published during the last decade, as applications using sequence stratigraphic concept have increased. This paper reviews current developments in terrestrial sequence stratigraphy in terms of sedimentation control factors and recognition methods of depositional sequences in terrestrial strata. Terrestrial sedimentary environments are divided into three territories ; coastal plains, transfer zones and inland basins. Relative sea-level changes are the most important control factors in coastal plains, whereas climate and tectonic movement are critical in inland basins. In coastal plains, a depositional sequence can be recognized by such strata indicative of marine incursion as tidal, bay, estuarine or shallow marine sediments, which constitute a maximum flooding surface. Frequency and size of fluvial channels are important signals for recognition of a depositional sequence in fluvial strata, because they may have been formed in response to changes of accommodation space corresponding to relative sea-level or base level changes. In inland basins, it is necessary to recognize cycles in relation with base level, climate and sediment supply changes. In any case, we need to improve terrestrial sequence models by carrying out further case studies on a large variety of geological settings.

Key words: Fluvial sequence stratigraphy, sedimentation control factors, coastal plain, inland basin, base level change, climatic change

1. 陸成層の探鉱とシーケンス層序学

近年、世界各地において陸成堆積物をターゲットとした探鉱活動が増加しつつある。これは浅海成砂岩貯留岩の探鉱の熟成による探鉱対象の移行やリフト堆積盆を対象とした探鉱の増加といった状況に加えて、陸成堆積物が有能な貯留岩ポテンシャル（河川成チャネル砂岩など）および根源岩ポテンシャル（河川後背湿地堆積物や

湖成堆積物など）を有することが認識されてきたこともその大きな理由の1つとしてあげられる。しかし、陸成堆積物の堆積作用は海成堆積物に比べて地形・構造運動・気候・供給物質などの様々な堆積規制要素の影響を受けやすく複雑であることから、貯留岩・根源岩分布予測には不確実性が伴う場合が多く、探鉱活動の障害となっている。

1970年代後半にサイスミック層序学として世に出され、その後の概念の進展とともに各地において盛んに探鉱活動に適用されている「シーケンス層序学 (sequence stratigraphy)」は、相対的海水準変動などの外的要因によるサイクルを基本層序単位として成因論的に堆積物を解析する概念・手法である (Posamentier *et*

* 石油公団石油開発技術センター砂岩油層開発最適化研究プロジェクトチーム Research Project Team for Optimization of Sandstone Reservoirs, Technology Research Center, Japan National Oil Corporation

al., 1988; Posamentier and Allen, 1999)。石油地質学の観点からすると、貯留岩・根源岩の分布を成因論的に推定あるいは解釈することが可能になったという点で、シーケンス層序学が新たな探鉱ツールの1つに加わったと言っても過言ではない。当初、シーケンス層序学は海成層を主体として適用されてきた。しかし、近年、陸成堆積物のシーケンス層序学的解析手法に関するアイデアや研究事例が多く発表され、シーケンス層序学が陸成層の解析ツールとしても用いられるようになってきている。このことは、不確実性を伴うことが多い陸成層の貯留岩・根源岩分布予測作業が、シーケンス層序学などの成因論的解析手法の適用によって、より確実性の高い状態で行うことできる可能性を示唆するものである。

本論では、陸成層を対象とした探鉱活動におけるシーケンス層序学の適用性を探ることを目的として、これまでに提案されているモデルをもとに、陸成層における堆積シーケンスの特徴と認定方法をいくつかの実例を示しながらまとめることとする。

なお、ここでいうシーケンス層序学とは、エクソンモデルなどのユースタシーを堆積サイクルの主要要因とするモデルに限るわけではなく、Posamentier and Allen (1999) によって定義されているように、近年の堆積相解析や堆積サイクル解析手法の統合による成因論的堆積盆解析全般を指すことをあらかじめ付記しておく。

2. 陸成層シーケンス層序学の進展と現状

シーケンス層序学の概念は、上述のように、初期的にはおもに海成堆積物に対して適用され、陸成堆積物（河川成、湖成など）はあまり考慮されなかった。これは、堆積シーケンスモデル中の陸成層の位置づけが明確でなかったことと、海成堆積物（とくに浅海堆積物）の堆積作用が基本的に相対的海水準変動に支配されているのに対し、陸成堆積物における堆積規制要素がより複雑であることによる。しかしその後、シーケンスモデル中の陸成堆積物の位置付けの明確化とともに、陸成～河川成層中の堆積シーケンスの認定方法について事例研究や新たなアイデアが次々と発表されてきており、陸成層シーケンス層序学の概念が構築されつつある。以下にこれまで発表された代表的な陸成層シーケンスに関する論文について簡単に紹介する。

Posamentier *et al.* (1988) では、シーケンス層序学のエクソンモデルの中で、陸成層は高海水準期においてプログレードするデルタ～沿岸システムの陸側におもに発達するとした。これに対して Wright and Marriott (1993) は、陸成層の堆積は高海水準期のみでなくむしろ海進期において厚く堆積するとし、加えて各堆積体

において河川チャネルの発達密度と形態が異なるというモデルを提示した。Shanley and McCabe (1993, 1994) は、1991年に設立された陸成層シーケンス層序学ワーキンググループの成果として、ベースレベル（浸食基準面をさし、海洋や沿岸では相対的海水準と一致）や河川平衡断面 (fluvial equilibrium profile) 変化に伴う河川チャネルの発達密度に関するモデルと内陸盆地の堆積シーケンスモデルを提示した。この後、いくつかの事例研究が各地の陸成層を対象として行われ (Aitken and Flint, 1995; Olsen *et al.*, 1995 など)、基本的に Wright and Marriott (1993) や Shanley and McCabe (1994) の概念を支持する結論が出されている。また陸成層の根源岩ポテンシャルが脚光を浴びるにしたがって、石炭層の発達と堆積シーケンスとの関連についての研究も多く行われるようになってきている (Diessel, 1998 など)。1998年には、1994年の AAPG/SEPM 年次集会時の特別セッションの総括として SEPM の特集号 (Special Publication) が発刊され (Shanley and McCabe, 1998)、陸成層の堆積におけるユースタシー、気候、テクトニクスの役割 (Ethridge *et al.*, 1998; Dalrymple *et al.*, 1998; Dam *et al.*, 1998) や、第四紀の実例 (Blum and Price, 1988)、砂漠環境の例 (Carr-Crabaugh and Kocurek, 1998) などがまとめられた。さらに Blum and Tornqvist (2000) においても研究の現状と展望がまとめられている。このように、1980年代末期から現在に至るまで、陸成層に関する堆積シーケンスモデルが提示され、なおかつ事例研究が数多く報告されるようになってきている。ただし、陸成層の堆積作用はさまざまな地質セッティングごとに異なる要素によって規制され、なおかつそれらの規制要素が複数存在することから、その複雑さと不確定さが完全にモデル上で包括されているわけではない。したがって現段階では、さまざまな地質セッティングにおける多くの事例研究による現存モデルの検証とそれらをまとめた包括的モデルの提示が必要となっている。

3. 陸域の堆積環境と堆積規制要素

ところで、陸域環境にはどのようなセッティングが存在し、それぞれどのような堆積規制要素によって規制され、それぞれどのような堆積システムや堆積シーケンスが形成されるのであろうか。Shanley and McCabe (1994) は、浅海から陸域にかけてのセッティングの違いによる主要な堆積規制要素の変化をまとめている (図1)。Shanley and McCabe (1994) が示した堆積規制要素変化の観点からすると、陸域環境は大きく3つの領域（海岸平野領域・中間領域・内陸盆地領域）に分けて考えることができる (図1)。以下、それぞれの領域にお

図1 海域～海岸平野～内陸盆地における主要堆積規制要素 (Shanley and McCabe (1994) を改変)

ける主要な堆積規制要素と、堆積システム、堆積シーケンスの特徴を概説する。

海岸平野領域：海岸平野領域は、海洋に面した比較的平坦な堆積領域で、堆積面が海水準に近いレベルにあり、おもにデルタプレーンや蛇行河川などの堆積システムが発達する。Posamentier and Vail (1988) では河川システムが発達する領域を coastal plain と alluvial plain とに区分しているが、ここでいう海岸平野領域は Posamentier and Vail (1988) の coastal plain にほぼ相当する。

海域同様、陸域環境においても堆積空間の増減が堆積作用に対する最も重要な規制要素であるが、陸域環境の場合、海域における相対的海水準に相当する、堆積空間を規定する面を「河川平衡断面 (fluvial equilibrium profile: Mackin, 1948)」と呼ぶ。河川平衡断面は河川において堆積も浸食も起きない平衡に達した面を意味し、現河床断面が河川平衡断面より低ければ堆積作用が起り、逆に高ければ浸食作用が起る (Posamentier and Allen, 1999)。海岸平野領域では、河川平衡断面が水平に近く、海水準とほぼ同じレベルであるため、河川平衡断面を相対的海水準に置き換えて考えることができる。すなわち、海岸平野領域においては、ユースタシーと沈降・隆起量の関数による相対的海水準変動が最も主要な堆積規制要素である (図1)。多くの場合、浅海領域同様、相対的海水準変動によって海進～海退の堆積サイクルが形成され、なおかつ堆積相の平面分布が規制されることになる。沈降・隆起量が量的・時間速度的にユースタシーを打ち消すものでない限りは、ユースタシーが相対的海水準変動を主導し、エクソンモデルのようにユースタシーに対応した堆積シーケンスが形成される。もし、気候変動や碎屑物供給の変化が大きい場合、海岸平野領域においても、気候変動や碎屑物供給による

サイクルが地層中に記録されることもある。

中間領域：ここでの中間領域とは、海岸平野と独立内陸盆地の中間の領域という意味で、地形学的には、海岸平野の内陸側縁辺部 (扇状地など)、海洋に面しているが地形断面にある程度傾斜がある場合 (ファンデルタなど)、または海洋に面していない盆地であるが河川によって海洋と連結され、海水準変動の影響を多少なりとも受ける山間盆地がこの領域に含まれる。一般に海岸平野領域との境界は不明瞭である場合が多い。本領域においてはおもにファンデルタ、蛇行河川、網状河川、扇状地などの堆積システムが発達する。

この領域における河川平衡断面は、通常、地形起伏、供給物質の粒度・量などの影響を受けて傾斜している (Leopold *et al.*, 1964)。相対的海水準、地形、沈降・隆起、碎屑物供給の変化が起ると、河川平衡断面の上昇・下降や断面形状の変化が発生するため、これによって堆積空間の変化が起る (Blum, 1990; Posamentier and Allen, 1999)。このようにして発生した堆積空間の変化によって、堆積相の分布が規定され、堆積サイクルが形成される。また、この領域では、堆積空間の増減のみならず、気候の変化や碎屑物供給の変化そのものによっても堆積サイクルが形成される。

すなわち、この領域における堆積作用は、ユースタシーと沈降の関数による相対的海水準に加えて、テクトニクスや気候によっても大きく支配されている (図1)。一般に、内陸側に向かうにつれて、ユースタシーの影響度が低くなり、沈降・隆起量と気候や碎屑物供給の堆積作用に対する影響が増大するが、実際には複雑な規制要素の影響を受け単純ではない。基本的に、その場所においてユースタシー、沈降・隆起、碎屑物供給、気候のいずれの要素の変化量が時間速度的に一番大きいかによって、主要堆積規制要素が何か、すなわち何による堆積サ

イクルが形成されるか決定される。しかしながら、それらの変化量がお互い似た値である場合、それぞれの規制によるサイクルが複合し、非常に複雑な堆積形態を示すことになる。規制要因が複雑であるがために最も研究が遅れている領域である。

内陸盆地領域：海洋から離れて独立した内陸の盆地、もしくは河川流路によって海洋と連結されているが海洋との間に隆起山脈などがあって、海水準変動の影響がほとんどない盆地がこの領域に含まれる。湖、蛇行河川、網状河川、扇状地、砂漠などの堆積システムが発達する。

内陸盆地領域では、ユースタシーの影響を受けることがほとんどなく、おもに気候とテクトニクスの変動によって発生する、河川平衡断面や湖面の変化による堆積空間の変化、碎屑物供給（量・物質）変化、沈降・隆起、地形変化の各要素によって堆積作用が支配される。すなわち、気候とテクトニクスの影響によって、扇状地、網状河川、蛇行河川あるいは湖などの堆積環境（堆積システム）が決定され、それらの変動によって堆積サイクルが形成される。どの要素が主要規制要因となって堆積サイクルが形成されるかは、個々の内陸盆地のセッティングによる。一般には堆積盆の生成発展に伴う大きなオーダーのサイクルは堆積盆のテクトニクスに支配され、堆積盆を埋積する堆積物内のサイクルは気候や構造運動による。また、気候、碎屑物供給、沈降・隆起量の各要素はお互い独立しているのではなく、密接に関連しあって堆積作用に影響を及ぼしている場合が多い。例えば、湖システムの場合、沈降・隆起や気候変動などによって発生する湖面変動が主要堆積規制要素となっている（Shanley and McCabe, 1994）。

4. 陸成層における堆積シーケンスの特徴と認定

では、それぞれの領域においてどのような特徴の堆積シーケンスが形成され、どのような視点から堆積シーケンスが認定できるのか、海岸平野領域と内陸盆地領域について以下にまとめる。

4.1 海岸平野領域

図2に陸棚～浅海域から海岸平野に至る範囲の堆積シーケンスの概念モデルを示す。上記のように海岸平野領域においては、河川平衡断面がほぼ水平で傾斜が小さくなかつ海水準とほぼ同じ面となるため、浅海域同様、一般に相対的海水準変動によって堆積シーケンスが形成される場合が多い。このため、海岸平野領域での堆積シーケンスの認定は沿岸～浅海～陸棚域同様、基本的にはシーケンス境界に相当する不整合の認定と海進・海退を示す堆積相累重の判定によって行われる。しかし、沿岸～浅海域では堆積深度を示す堆積帯が比較的細かく区分できるため堆積相累重から海進・海退を読み取るのが比較的容易であるのに対し、河川システムを主体とする地層では同じ河川システム中で海進・海退現象を読み取るのは容易ではない。とくに海岸線から距離があり、かつ面積の広い河川システムを主体とする堆積盆地では、岩相上、上下方向に顕著な変化が見られないことも多い。

このような河川システムにおいてどのように堆積シーケンスを認定するかという点について、以下のような方法が提案されている。

海の「差し込み」による最大海氾濫面の認定：1つの堆積シーケンスの中で最も海進が進んだ面を「最大海氾濫面（maximum flooding surface）」と呼ぶ。海岸平野

図2 陸棚～浅海～海岸平野もしくは海洋に面する陸域堆積盆に至る範囲の堆積シーケンスの概念モデル

領域が比較的平坦である場合、最大海氾濫面付近において内陸側に海の「差し込み (marine incursion)」が起ることが期待される。どのくらいの規模で差し込みが起るかは、海岸平野もしくは海洋に面する堆積盆の平坦度と堆積速度によるが、全く平坦な平野であれば相当距離の差し込みもあり得る (Blum, 1990)。したがって、海岸平野領域においては、海の差し込みを最大海氾濫面として堆積シーケンスを認定することが可能である (図 2, 図 4)。差し込みは、決して完全な海成層である必要はなく、潮汐堆積物やラグーンやエスチュアリー堆積物であれば最大海氾濫面の認定において重要な役割を果たす (Shanley *et al.*, 1992)。海の差し込みの認定は、堆積相のみならず、微化石 (有孔虫、珪藻、渦鞭毛藻など) を用いることによって可能である。

図 3 に、北海道の始新統石狩層群における堆積シーケンスの認定例を示す。石狩層群は内湾～河川システムからなり、低海水準期～海進期前期と高海水準期後期は蛇行～網状河川環境において、海進期後期～高海水準期前期にかけては内湾環境において堆積したことが明らかになっている (高野ほか, 1998)。河川堆積物中における内湾環境を示す最大海氾濫面の追跡によって、石狩層群は 4 つの三次オーダー堆積シーケンスに区分可能である。

低海水準期低下期の開析谷によるシーケンス区分：河川システム中において開析谷が認定されれば、その基底をシーケンス境界として堆積シーケンスを認定すること

ができる (図 4)。エクソンモデルでは、低海水準期には陸棚～浅海より陸側に陸上露出と浸食が起り、部分的に開析谷が形成されるとしている。海岸平野ではこのモデルどおり、相対的海水準の低下に伴って堆積空間がなくなり、上方への積層が止んで下方への浸食が発生するため開析谷が発達する。この基底面はシーケンス境界に相当することから、河川システム中において開析谷が認定されれば、その基底をシーケンス境界として堆積シーケンスを認定することができる。Shanley and McCabe (1994) では、相対的海水準と開析谷の形成、埋積過程についてダイアグラムを示している。

河川チャネルの頻度によるシーケンスの認定：Schumm (1993), Wright and Marriott (1993), および Shanley and McCabe (1994) は、河川システムでは相対的海水準もしくは河川平衡断面の変動に伴う堆積空間の変化によって以下のように 1 つの堆積シーケンス内で垂直方向に河川チャネルの頻度やサイズが変化するとし、これをもとに河川システム中の堆積シーケンスが認定できるとしている (図 4)。低海水準期には Shanley and McCabe (1994) で指摘されているものと同様、開析谷が形成される。その後海進期にかけてチャネルの累重によって開析谷が埋積される。その後海進期後半においては徐々にチャネルの出現頻度とサイズが減少する。最大海氾濫面において最もチャネルの出現頻度が低くなり、氾濫原～後背湿地堆積物が卓越する。堆積環境が平坦な海岸平野領域で碎屑物供給量が大きくない場合、最

図 3 北海道空知地域における始新統石狩層群の堆積システム・堆積シーケンス区分断面図 (高野ほか, 1998)

図4 河川堆積物中の堆積シーケンスとチャンネルの出現頻度・内部形態との関係 (Wright and Marriott, 1993; Shanley and McCabe, 1994 をもとに作成)

大海氾濫面において浅海～湾～エстуアリー堆積物が挟在される場合が多い。その上位の高海水準期堆積体では上方に向かって再びチャンネルの出現頻度とサイズが徐々に増大する。チャンネルの出現頻度からすると、開析谷埋積物と海進期堆積体の下部は網状河川流、海進期堆積体上部～高海水準期堆積体下部は蛇行河川流、そして高海水準期上部では再び網状河川流が卓越するということになる。

以上のチャンネルの出現状態の変化は、河川システムにおける堆積空間の変化の影響を受けている。一般に1つの堆積シーケンスではシーケンス境界形成時に最も堆積空間増加率が小さく、最大海氾濫面付近において最も堆積空間増加率が大きい(図2)。海進期の前期に相当する開析谷の埋積期～埋積直後では堆積空間の増加率がまだ大きくないのでチャンネルが側方にシフトしやすく、チャンネルの相対的な密度が増加する。これに対して海進期の後期と高海水準期の前期は上方への堆積空間増加量が最も大きい時期に相当するため、チャンネルは側方にシフトせず上方に累重しながら堆積する傾向にある。このため、相対的にチャンネルの出現頻度は低くなり、後背湿地の堆積物が卓越することになる。高海水準期の後期では再び堆積空間増加率が低下するため、チャンネルが側方にシフトしやすくなり、チャンネルの相対的出現頻度が増加する。

河川チャンネルの内部・外部形態によるシーケンスの認定: 堆積シーケンス内における堆積空間増加率の変化は、河川チャンネルの形態にも影響を与えている (Shanley

and McCabe, 1994)。まず河川チャンネルの内部形態に着目すると、開析谷埋積物～海進期前期および高海水準期後期のチャンネルには multi-story channel (複合埋積チャンネル) もしくは multi-lateral channel が卓越するのに対し、海進期後期および高海水準期前期のチャンネルには single story channel (単一埋積チャンネル) が卓越する。ここでいう multi-story channel とはチャンネルの内部に複数の浸食面が存在する複合チャンネルを意味し、堆積時に上方への堆積空間の増加が十分でなかったため、チャンネルの浸食→埋積が何回も繰り返り起こったことを示している。multi-lateral channel とは複数の浸食面が側方々向に配列しているチャンネルを指し、同じく上方への堆積空間が少ないため、側方にチャンネルが移動したことを示している。一方、single story channel とはチャンネル内に浸食面のない単一埋積チャンネルを意味し、1回の浸食と埋積の後、上方への堆積空間が十分であったため、埋積後再び浸食されことなく地層として保存されたものである。

河川チャンネル外部形態も堆積空間増加率の変化の影響を受けている。すなわち、海進期前期および高海水準期後期のチャンネルは、堆積空間増加率が少なく側方に連続してシフトしやすいため、側方に長いシート状の形態をとりやすい。一方、海進期後期および高海水準期前期のチャンネルはリボン状の形態を取ることが多い。

図5には北海道石狩層群における堆積シーケンス内での河川チャンネル挟在頻度と形態の変化の例を示す。堆積シーケンスの基底部(低海水準期堆積体(LST)～海進

図5 北海道始新統石狩層群における河川チャネル出現状況・内部形態と堆積シーケンスの関係(炭山川セクションの堆積シーケンス Isk-4 の例)

期堆積体 (TST) 下部) では、チャネル挟在密度が高くなかつ multi-story channel が卓越するのに対し、海進期堆積体 (TST) 上部～高海水準期堆積体 (HST) 下部ではチャネル挟在頻度が低くなり single story channel が卓越するようになる。

4.2 内陸盆地領域

内陸盆地領域で認められる堆積サイクルは、基本的にテクトニクスや気候などのサイクルに対応したものであって、海洋の沿岸部における相対的海水準変動による堆積シーケンスとは独立した固有のサイクルである場合が多い。これらの堆積サイクルには堆積空間の変動に伴う不整合と関係の無い、碎屑物供給のみによる堆積サイクルや気候変動による堆積サイクルなども含まれるた

め、Mitchum (1977) による堆積シーケンスの定義(「不整合面とこれに対応する整合面を境界とした成因論的に関連した地層群」)にそぐわない場合が生じうる。そこで本論では内陸盆地に関しては「堆積シーケンス」のかわりに、より広い意味での成因論的に関連した地層群を表す「堆積サイクル」の呼称を用いておくこととする。いずれの要素による堆積サイクルであれ、これらは内陸盆地における地層の重要な時間層序ユニットであり、堆積解析の際の基本層序単位となる。以下、内陸盆地領域における堆積サイクルの特徴(図6)と認定方法について述べる。

堆積盆テクトニクスの変化による堆積サイクル：内陸盆地における累層～層群オーダーの堆積サイクルは、堆積盆の生成・発展などの堆積盆テクトニクスに呼応したものである場合が多い。このサイクルは堆積盆オーダーの沈降率の変化や碎屑物供給の変化に伴う堆積システムの変化によるため、堆積システムの縦方向、横方向の変化や碎屑物供給系、構造地質学的特徴を捉えることが肝要である。

河川平衡断面(もしくは湖面)変動による堆積サイクル：累層や部層より細かいオーダーに対応する堆積サイクルは、気候変動や構造運動(断層など)による、河川平衡断面の変動、湖面変動、碎屑物供給量変動、供給物質変動などによって形成される。このうち、河川平衡断面変動・湖面変動による堆積サイクルは、基本的に堆積空間の増減によるサイクルであるため、海岸平野領域同様、a) 堆積システムの前進・後退もしくは湖進・湖退サイクル、b) 平衡断面・湖面低下時の開析谷、c) 河川チャネルの挟在頻度・形態などを認定することによって明らかにできる。湖面変動の場合、湖面変動によって次のような堆積相累重が見られることが多い(Shanley and McCabe, 1994)。まず湖面低下によって浸食面が形成される。その後、低湖面期には蒸発岩が堆積する。その後、湖面上昇による湖進期には、湖進に伴う上方深化サクセッションが発達し、碎屑物の流入の減少から炭酸塩岩の堆積が見られることがある。続く高湖面期には碎屑岩の堆積が卓越し、湖退に伴う上方浅化サクセッションが発達する。

碎屑物供給(量・物質)変化による堆積サイクル：碎屑物供給(量・物質)変化は、気候変動や後背地の構造運動の影響を受けて発生し、堆積物中にサイクルを形成する(Kelly, 1993)。碎屑物供給量が増加すると、堆積物中の碎屑岩の量比が増し、上方粗粒化・厚層化サクセッションが形成される。一方、碎屑物供給量が減少すると、上方細粒化・薄層化サクセッションが形成される。湖成層の場合には、堆積物中の炭酸塩岩の量比が増加す

図6 内陸盆地領域における堆積サイクルの例

る。

気候変動による堆積サイクル：気候変動は碎屑物供給や河川平衡断面（湖面）に影響を与えるばかりでなく、堆積物の性質そのものに影響を与え、堆積サイクルを形成する。気候が湿潤であると、碎屑物の流入が増加したり、古土壌の形成が促進される。一方、気候が乾燥すると、蒸発岩、砂漠成砂岩や炭酸塩岩が卓越する傾向がある。また氷河が発達すると氷礫岩（tillite）が堆積する。

5. 今後の課題

本論では、陸成層シーケンス層序学の進展を概説した上で、陸成層の主要堆積規制要素は何か、それによってどのような堆積シーケンスが形成されるのか、それをどのように認定するのかの3点について重点的に述べた。しかしながら、これらを今後の陸成層の探鉱に生かすためには、以下の点についてさらなる解析およびまとめが必要であろう。

- 1) 内陸盆地～中間領域における事例研究の蓄積とモデルの構築：内陸盆地～中間領域における堆積規制要因と堆積サイクルの因果関係は複雑であり、未解明の部分が多い。各種セッティングにおける事例研究を積み重ね、より明瞭なモデルを構築していく必要がある。
- 2) 内陸盆地における堆積シーケンスの定義の明確化：前述のように、Mitchum(1977)やPosamentier et al. (1988)による「堆積シーケンス」の定義を用いた場合、内陸盆地の堆積サイクルを表現できない場合がある。統合的堆積盆解析という広い意味で陸成層にもシーケンス層序学を包括的に適用しようとする場合、新たな定義や概念の提示が必要である

う。

- 3) 解析・解釈手法確立の必要：石油探鉱の局面において陸成層における堆積シーケンスを認定していく場合、高解像度の地震探査データや坑井データ（物理検層・古生物データ）が必要である。これらのデータを用いた陸成層シーケンス層序の解析手法を構築する必要がある。
- 4) 確率論との融合：従来、河川成チャネルの分布は定性的・帰納法的手法では予測困難であるとの判断から、確率論的モデリングが行われてきた。新たな定性的・帰納法的解釈手法であるシーケンス層序学の概念と確率論的モデリングとの融合は、河川チャネル推定の新手法を生み出す可能性がある。

謝 辞

本研究の一部は、石油公団石油開発技術センター地質・地化学研究室の大型研究「三次元堆積盆地解析システム技術」および経常研究「石油鉱床形成における堆積作用・続成作用に関する基礎研究」の一環として行われたものである。同研究室の辻 喜弘室長、井口 隆研究員、石油資源開発株式会社技術研究所早稲田 周博士、南館 有氏には、研究遂行の上で、ご協力、ご助言いただいた。National Science Foundation(米国)のBilal U. Haq 博士には陸域シーケンス層序学の進展状況について教示いただいた。ENRES International(オランダ)のSwie Djin Nio 博士には河川成砂岩について多面にわたりご教示いただいた。以上の方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- Aitken, J. F. and Flint, S. S., 1995 : The application of high-resolution sequence stratigraphy to fluvial systems : a case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, USA. *Sedimentology*, **42**, 3-30.
- Blum, M. D., 1990 : Climatic and eustatic controls on Gulf coastal plain fluvial sedimentation : an example from the Late Quaternary of the Colorado river, Texas. In Armentrout, J. M. and Perkins, B. F., eds. : *Sequence Stratigraphy as an Exploration Tool : Concepts and Practices in the Gulf Coast*. Gulf Coast Section SEPM Foundation, Proceedings of the 11th Annual Research Conference, 71-83.
- Blum, M. D. and Price, D. M., 1998 : Quaternary alluvial plain construction in response to glacio-eustatic and climatic controls, Texas Gulf Coastal Plain. In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 31-48.
- Blum, M. D. and Tornqvist, T. E., 2000 : Fluvial responses to climate and sea-level change ; a review and look forward. *Sedimentology*, **47**, 2-48.
- Carr-Crabaugh, M. and Kocurek, G., 1998 : Continental sequence stratigraphy of a wet eolian system : a key to relative sea-level change. In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 213-228.
- Dalrymple, M., Prosser, J. and Williams, B., 1998 : A dynamic systems approach to the regional controls on deposition and architecture of alluvial sequences, illustrated in the Statfjord Formation (United Kingdom, Northern North Sea). In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 65-81.
- Dam, G. and Sonderholm, M., 1998 : Sedimentological evolution of a fault-controlled Early Paleocene incised-valley system, Nuussuaq Basin, West Greenland. In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 109-121.
- Diessel, C. F. K., 1998 : Sequence stratigraphy applied to coal seams : Two case histories. In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 151-173.
- Ethridge, F. G., Wood, L. J. and Schumm, S. A., 1998 : Cyclic variables controlling fluvial sequence development : Problems and perspectives. In Shanley, K. W. and McCabe, P. J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., No. 59, 17-29.
- Kelley, S. B., 1993 : Cyclical discharge variation recorded in alluvial sediments : an example from the Devonian of southwest Ireland. In North, C. P. and Prosser, D. J., eds. : *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs*. Geological Society Special Publ., No. 73, 157-166.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J. P., 1964 : *Fluvial processes in Geomorphology*. W. H. Freeman & Company, San Francisco, 522 p.
- Mackin, J. H., 1948 : Concept of the graded river. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **59**, 463-512.
- Mitchum, R. M., Jr., 1977 : Seismic stratigraphy and global change of sea level, part 1 : glossary of terms used in seismic stratigraphy. In Payton C. E., ed., *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir, No. 26, 117-143.
- Olsen, T., Steel, R. J., Hogseth, K., Skar, T. and Roe, S-L., 1995, Sequence Architecture in a fluvial succession : sequence stratigraphy in the Upper Cretaceous Mesaverde Group, Price, Utah. *Jour. Sedim. Res.*, **B65**, 265-280.
- Posamentier, H. W., Jervey, M. T. and Vail, P. R., 1988 : Eustatic controls on clastic deposition I—Conceptual framework. In Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H., Ross, C. A. and Van Wagonar, J. C., eds. : *Sea-level changes : an integrated approach*. SEPM Spec. Publ., No. 42, 109-124.
- Posamentier, H. W. and Vail, P. R., 1988 : Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models. In Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H., Ross, C. A. and Van Wagonar, J. C., eds. : *Sea-level changes : an integrated approach*. SEPM Spec. Publ., No. 42, 125-154.
- Posamentier, H. W. and Allen, G. P., 1999 : *Siliciclastic Sequence stratigraphy—Concepts and Applications*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 7, 210 p.
- Schumm, S. A., 1993 : River response to baselevel change : implications for sequence stratigraphy. *Jour. Geol.*, **101**, 279-294.
- Shanley, K. W., McCabe, P. J. and Hettlinger, 1992 : Tidal influence in Cretaceous fluvial strata from Utah, USA : a key to sequence stratigraphic interpretation. *Sedimentology*, **39**, 905-930.
- Shanley, K. W. and McCabe, P. J., 1993 : Alluvial architecture in a sequence stratigraphic framework : a case history from the Upper Cretaceous of southern Utah, U.S.A. In Flint, S. and Bryant, I. eds. : *Quantative modelling of clastic hydrocarbon reser-*

- voirs and outcrop analogues*. Int. Assoc. Sedim. Spec. Publ., No. 15, 21-55.
- Shanley, K. W. and McCabe, P. J., 1994 : Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **78**, 544-568.
- Shanley, K. W. and McCabe, P. J., 1998 : *Relative Role of Eustasy, Climate, and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Spec. Publ., 59, p. 234.
- 高野 修・早稲田 周・西田英毅・一ノ関鉄郎・横井研一, 1998 : 北海道始新統石狩層群の河川～内湾システムと堆積シーケンス. 堆積学研究, No. 47, 33-53.
- Wright, V. P. and Marriott, S. B., 1993 : The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems : the role of floodplain sediment storage. *Sedim. Geol.*, **86**, 203-210.