堆積シーケンスとその境界の認定と意義

安 藤 寿 男*

Recognition and Significance of Depositional Sequences and their Boundaries

Hisao ANDO*

Abstract

The depositional sequence concept was established in newly developed sequence stratigraphy, as an unconformity-bounded stratigraphic unit formed during one complete sea-level cycle. This paper reviews general meanings of “sequence”, the definition of depositional sequences, their hierarchical patterns and recognition, and sequence boundaries problems, from a viewpoint of sedimentary geology based on outcrops and bore-hole samples.

Though the word, “sequence” has many meanings generally applied to successive geologic events and processes in chronologic order, a depositional sequence is defined in a special sense, as “a relatively conformable succession of genetically related strata bounded at its top and base by unconformities and their correlative conformities”. The depositional sequence as one of hierarchical transgressive and regressive units (T-R units), has the first- to forth-order operational units, that is, the megasequence, supersequence, sequence and parasequence in descending order. A sequence boundary with a significant hiatus (=unconformity) is formed by subaerial exposure, concurrent subaerial erosion and partly submarine erosion during eustatic falls or low-stand sea level.

The latter half of this paper emphasizes the difference between sequence boundaries and ravinement surfaces. The ravinement surface formed as one of diastems or “transgressive surfaces”, is an erosional surface by shoreface retreat during the following transgression after a sea-level fall. In general, it is lithologically more distinct than the underlying sequence boundary. The right recognition of the difference leads correct reconstructions of sedimentary history.

I. はじめに

1970年代後半以降, 堆積相解析の進展によって陸棚～海浜堆積物の研究は著しく増大した。地質時代の地層についても現世の堆積物や堆積システムとの比較から, かなり正確な堆積環境や堆積深度がわかるようになってきた(たとえば, WALKER, 1984; READING, 1986など)。一方, VAIL *et al.* (1977) の大きな貢献によって地震波による地下地質断面の解析を手法とする地震層序学 (seismic stratigraphy) が確立された。そして, 化石層序・古地磁気層序や酸素・炭素同位体解析など様々な手法を駆使して海水準変動曲線や地層中の堆積シーケンスの関係が調べられてきた。ここ数年は地震層序学の手法や概念を露頭層

* 東京大学総合研究資料館

* University Museum, University of Tokyo

序断面に適用することによって、地質時代の地層のシーケンス理解は急速に深まり、シーケンス層序学 (sequence stratigraphy) へと発展している。とりわけ、海水準変動と堆積シーケンス境界の形成過程は今なお多くの議論があり、ホットな話題となっている。ここ2~3年、シーケンス層序学のテキストや論文集が出版されるようになって、その結果が蓄積されつつある (NUMMEDAL *et al.*, 1987; JAMES and LECKIE, 1988; WILGUS *et al.*, 1988; NUMMEDAL *et al.*, 1989)。

シーケンス層序学が注目され採用する研究者が多くなると同時に、シーケンスという語を用いる頻度が多くなってきた。ところが、シーケンスという語は今日まで多くの意味に使われてきており、誤用や混同、曖昧な使用が少なくない。日本では堆積シーケンスの概念がまだ十分に理解されているとは言い難いと感じるので、この機会に堆積シーケンスの概念や区分、その境界問題に焦点を当ててレビューを行いたい。

小論は筆者が北海道白亜系中部蝦夷層群三笠層の堆積相解析 (安藤, 1990a, b) の過程で出会ったシーケンス境界の問題に端を発してまとめたものである。なお本論で用いる海進・海退の定義は斎藤 (1989b) のレビューに従う。

II. シーケンスとは何か？

シーケンス (sequence) という語は、1985年以降になって日本の地学系辞典類 (例えば、海洋大事典：和達, 1987) に単独用語として取り上げられるようになった、必ずしも十分に理解されているとは言い難い未成熟な語である。Glossary of Geology (BATES and JACKSON, 1987) によれば次のようにある。

- (a) A succession of geologic events, processes or rocks, arranged in chronologic order to show their relative position and age with respect to geologic history as a whole.
- (b) A major informal lithostratigraphic unit of greater than group or supergroup rank, traceable over large areas of a continent, and bounded by unconformities of interregional scope, such as in the cratonic interior of North America (SLOSS, 1963): a geographically discrete succession of major rock units that were deposited under related environmental conditions (SILBERLING and ROBERTS, 1962).
- (c) A term, now obsolete, used by MOORE (1933, p. 54) for the rocks formed during an era.
- (d) A faunal succession.

層序学で広く用いられている (a) は、時系列をなして配列する地質現象の連続や順序を意味する。したがって単層ユニットや堆積相をはじめとして、様々な現象に適用される広義の語である。その意味で (d) は (a) に含まれるであろう。SALVADOR (1987) によれば、sequence を層序学的な意味で用いた最初は MOORE (1933) であるが、現在では (c) のユニットは *erathem* と呼ばれている。

(b) の前半部は、SLOSS (1963) が提唱した、北アメリカ大陸内部の安定地塊に見られる、不整合で境され層群・累層群を超える大きな岩相層序単位である。ただし、この用法は *informal* なものの指摘がある。しかし、シーケンス層序学で用いるシーケンスはこの語義に由来するが、かなり異なる意味で使われている。今後、使用の頻度が高まると予想される。

なお、(b) 後半部の SILBERLING and ROBERTS (1962) の用法は、最終的に SLOSS (1963) のシーケンスと同じものを指示すると思われるが、その定義は曖昧である。

ここで層序学や堆積学に関わるシーケンスの用法を、そのスケールや対象として境界の定義によって大まかに類型化すると、(1) 単層/層理シーケンス (bed/stratification sequence), (2) 岩相シーケンス (facies sequence), (3) 層序シーケンス (stratigraphic sequence), (4) 堆積シーケンス (depositional sequence) に4分されよう。これらは必ずしも厳格な使い分けがなされているのではなく、意味が重複することも少なくないが、シーケンス概念の理解に不可欠と考え、便宜的に大別した。

(1) は単層中における *bed form* や *stratification* の上方への変化を指す。タービダイトに見られる BOUMA シーケンス (BOUMA, 1962) やハンモック状斜交層理シーケンス (DOTT and BOURGEOIS, 1982) がこれにあたる。これは1回の、あるいは一連の堆積イベントのエネルギーレベルを反映した堆積構造の変化を意味している。

(2) は、連続する層序断面における堆積相の変化に注目した用法で、必ずしも境界不連続面を一義的な定義とするものではない。つまり、方向性をもった堆積環境の変化を反映した地層群に適用した用法である。例えば、タービダイトの上方粗粒化・厚層化（あるいは細粒化・薄層化）シーケンスがあげられる (WALKER, 1978)。沿岸成層の前進性シーケンス (*progradational sequence*) や後退性シーケンス (*retrogradational sequence*) などこの区分に該当するであろう。ただし、RYER (1977) や CLIFTON (1981) が示した前進性シーケンスは、上下の境界が明瞭な層序不連続面になっており、結果としてそのまま (4) と同意になる実例もある。

(3) は、累層や層群レベルの層序ユニットの連続性に対して使われる (2) よりも、やや大局的な概念として使われることが多い。地殻変動、海水準変動などの大規模な一連の地質現象を反映した地層群を対象としている。意味的には前述の (a) に由来し、一部は (2) や (4) と重複するかもしれないが、境界の定義が一義的でなく不明確なことが多いので、ここでは (4) とは区別した。

(4) については次に詳述する。

III. 層序区分単位としての堆積シーケンス

層序学における堆積体の最も基本的な構成単位は、言うまでもなく、岩相層序単位としての累層 (*formation*) である。これは岩相が共通し、層序の位置が決まっている一群の地層を指し、必ずしも成因や形成過程に言及したものではない。したがってこの岩相層序単位は時間面と斜交することもある。また、累層の境界は海底侵食面、無堆積面あるいは広域に追跡される堆積環境の急激な変化を反映する岩相境界、または陸上侵食面などに基づくが、境界面の種類は一義的ではない。

ところが、シーケンス層序学では堆積シーケンス (*depositional sequence*: 単にシーケンスと呼ぶことも多い) を基本的単位としている。地震層序学に関する用語をまとめた MITCHUM (1977) によれば、「上下限が不整合あるいはその不整合に対比される整合面で境された、成因上関係がある相対的に整合的な地層からなる層序ユニット」と定義される。1つの完全な海水準変動周期の間に堆積した層序単位とも解釈される。不整合を境界とした層序単位 (*unconformity-bounded unit*: CHANG, 1975) が年代層序区分単位として有効であるという VAIL *et al.* (1977) の主張は、「不整合面はたとえ時間面と斜交 (通時的: *diachronous*) していたとしても、不整合面を挟んだ上下で時間が斜交しない」点にある。つまり不整合面の下位の地層は上位の地層に比べ必ず古いというのである。MITCHUM (1977) では堆積シーケンスを作業的な層序単位とみなし、用いる手法によって *seismic sequence*, *well-log sequence*, *maritime sequence*, *hinterland sequence* と使い分け、複数のオーダーに用いている。

堆積シーケンスは現世や地質時代の大陸縁辺部の広大な地域をカバーする反射地震断面で認定されることが多い。反射波は異なる反射特性をもった地層の境界面で生ずる。つまり反射特性は岩相よりも不連続面に大きな影響を受ける (VAIL *et al.*, 1977)。反射波の不連続面が地層面に平行となる理由はここにある。このことが地震波や音波の反射パターンを年代層序対比に用いることを可能にするのである。

すでに述べたとおり、堆積シーケンスのシーケンスという語は SLOSS *et al.* (1949) や SLOSS (1963) に由来する。しかし、SLOSS (1963) によるシーケンスの定義とはやや異なる意味で使われている。NORTH AMERICAN COMMISSION ON STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE (1983) は不連続面境界層序単位 (*discontinuity-bounded unit*) とした新たに *allostratigraphic* ユニットを提唱した (表1)。これは、

“a mappable stratiform body of sedimentary rock that is defined and identified on the basis of its

表 1 不整合に関連した層序単位とその階層性
斜体字は基本的単位。OWEN (1987) より改編。

Table 1. Unconformity-related stratigraphic units and their hierarchy
Fundamental units are italicized. Modified from OWEN (1987).

A. Unconformity-bounded units (these units are being formally proposed)
Supersynthem
<i>Synthem</i>
Interthem
B. Seismic stratigraphic units (these units are informal)
Supersequence
<i>Sequence</i>
Parasequence
C. Allostratigraphic units (these units are formal)
Allogroup
<i>Alloformation</i>
Allomember

A: CHANG (1975); B: VAIL *et al.* (1977); HAQ *et al.* (1988); C: NORTH AMERICAN COMMISSION ON STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE (1983)

bounding disconformities.”

と定義されているが、主に第四系の層序区分を対象としたもので、直接堆積シーケンスを考慮したものではない。その後、International Subcommission on Stratigraphic Classification (SALVADOR, 1987) は、不整合を境界とする層序単位に関するコメントを提示した。シーケンスの概念や語法の歴史的経緯をまとめた上で、誤用や混乱を避けるためにも、CHANG (1975) が不整合境界層序単位として初めて命名した *synthem* を採用するよう勧めている。これによって不整合境界層序単位が、岩相層序単位や化石層序単位とは異なる独立した層序単位系として formal に認められたことになる。

OWEN (1987) は多くの層序単位系の 1 グループとして不整合関連単位 (unconformity-related units) を表 1 のようにまとめた。その上で、例えば累層のように formal な (明確な定義と階層的位置が与えられており、特定の層序区分に用いると語頭が大文字になる) 用語に対し、シーケンスという語は未だに informal な扱いがなされていることを指摘している。

一方、HAQ *et al.* (1988) は岩相層序単位として定義された堆積シーケンスを拡張し、年代層序単位としてシーケンス帯 (sequence chronozone) を設け、海水準変動周期 (cycle あるいは *sechron*) を、例えば中生代の代のような地史年代単位に位置づけた。さらにそれらの階層的な単位や系を提示した (表 2)。

以上のように、今のところ堆積シーケンスは不整合境界層序単位として、十分に formal なものと認められたわけではない。しかし、煩雑な命名法の問題は別として、シーケンス層序学の進展が地層の見方を大きく変えている現状を鑑みると、堆積シーケンスの概念を理解することは重要と思われる。

IV. 堆積シーケンスの階層性

層序学では、周期的な層序単位の区分法や階層性の認定は研究者によってかなり異なる。表 3 は BUSCH and WEST (1987) をもとに新たな文献を加えて作成した、シーケンス層序学に関わる層序単位の区分と階層性をまとめたものである。彼らは海水準に対して深海化—浅海化周期を繰り返す層序単位を、単位のレベルに関わらず、階層的海進—海退ユニット (hierarchical transgressive-regressive unit: T-R ユニットと略称) と呼び、年代層序の枠組みに用いている。これは WRIGHT (1986) の海進—海退海岸線周

表 2 シーケンス層序学における層序・年代区分単位

HAQ *et al.* (1988)を改編。

Table 2 Stratigraphic and chronologic units used in sequence stratigraphy

Modified from HAQ *et al.* (1988).

Lithostratigraphy (Rock unit)	Chronostratigraphy (Time-rock unit)	Geochronology (Time unit)
Group	Erathem	Era
Formation	System	Period
Member	Series	Epoch
Bed	Stage	Age
<i>Sequence stratigraphy</i>	<i>Sequence chronostratigraphy</i>	<i>Sequence chronology</i>
Megasequence(1st order)	Megasequence chronozone	Megasechron-Megacycle
Supersequence(2nd order)	Supersequence chronozone	Supersechron-Supercycle
Sequence(3rd or 4th order)	Sequence chronozone	Sechron-Cycle
Parasequence(4th and higher order)	Parasequence chronozone	

期 (transgressive-regressive shoreline cycle) や HANCOCK (1975) や KAUFFMAN (1977) の海進—海退周期 (transgressive-regressive cycle) に対応するものであろう。

VAIL *et al.* (1977), HAQ *et al.* (1988) のシーケンスもこの T-R ユニットの1つである。彼らはいずれも地球規模の海水準変動によって生ずる他因周期性 (allocyclic) の層序単位として4種類以上のオーダーにわたる(第1～4オーダー)堆積シーケンスを認めた。

以下ではこれらの T-R ユニットが堆積シーケンスとほぼ同義であるとして、第1から第6オーダーの順に説明する。図1は堆積シーケンスの階層性を概念的にまとめたものである(BUSCH and WEST, 1987)。曲線は不整合で挟まれたある地層が示す古水深曲線で、その変動が階層性を有することを示している。

第1オーダーのシーケンスは、225～300m.y. 間隔の megasequence set と、その下位に配置される megasequence である (HAQ *et al.*, 1988)。前者は顕生果代に氷河時代と無氷河時代を2回繰り返す周期に対応する。この周期に関しては増田 (1989) に詳しい。

第2オーダーのシーケンスは、反射地震断面で認められる大規模な不整合に挟まれた supersequence や supersequence set であり (HAQ *et al.*, 1988), 20～90m.y. 間隔である。これは CHANG (1975) が synthem と呼んだものに比較される。

第3オーダーのシーケンスは反射断面や露頭層序断面で最も頻繁に認められる。HAQ *et al.* (1988) や VAIL *et al.* (1977) の sequence がこれに当たり、時間間隔は7～13m.y. である。作業単位としてシーケンスと呼んだ場合には、このオーダーを指すことが普通である。

第4オーダー以下の小スケールのシーケンスも、不整合境界やそれに対比される整合面をもったユニットで、周期は平均0.6～3.6m.y. (BUSCH and WEST, 1987) である。VAN WAGONER *et al.* (1988) が定義した、海氾濫面 (marine-flooding surface) によって境された小さな準シーケンス (parasequence) や、それらが複数で束をなす準シーケンスセット (parasequence set) がこのオーダーに位置づけられる。他に RAMSBOTTOM (1979) がヨーロッパの石炭系から見いだした mesothem が該当する。

第5オーダーのシーケンスは平均40万～50万年の周期をもち、WANLESS and WELLER (1932) や CHANG (1975) のサイクロセムや、HECKEL (1986) が北アメリカの上部石炭系で見いだした major cycle がこれにあたる。

最後の第6オーダーのシーケンスには GOODWIN and ANDERSON (1985) の分断埋積周期 (punctuated aggradational cycle: PAC) がある。これは南ウェールズの石炭系ウーライト石灰岩で見いだされ

表 3 周期的な層序単位の階層性
 BUSCH and WEST (1987) を改作。
 Table 3 Hierarchy of cyclic stratigraphic units
 Modified from BUSCH and WEST (1987).

BUSCH & ROLLINS 1984 BUSCH & WEST 1987	HAQ <i>et al.</i> 1988 VAN WAGONER <i>et al.</i> , 1988 VAIL <i>et al.</i> , 1977		International Subcommission on Stratigraphic Classification (SALVADOR, 1987)	CHANG, 1975 (RAMS- BOTTOM 1979)	MOORE, 1936	GOODWIN & ANDERSON, 1985	HECKEL, 1977 HECKEL, 1986	WANLESS & WELLER, 1932
	lithostratigraphy chronostratigraphy	sea-level ch. sequence chronology						
Transgressive- regressive unit (T-R unit)								
1st-order 225-300 m.y.	Megasequence set Megasequence	Megacycle set Megacycles	Supersynthem					
2nd-order 20-90 m.y.	Supersequence set Supersequence	Supercycle set Supercycles	Synthem	Synthem				
3rd-order 7-13 m.y.	Sequence	Cycle	Subsynthem	Subsynthem Superinter- them				
4th-order 0.6-3.6 m.y.	Parasequence set Parasequence			Interthem (Mesothem)				
5th-order 300-500×10 ³ years	Parasequence			(Cyclothem)	Megacyclo- them	Shallowing PAC sequence	Kansas cyclothem Major cycle	Cyclothem
6th-order 50-130×10 ³ years					Cyclothem	Punctuated Aggradational Cycle (PAC)	Minor cycle	

た1~5 m 間隔の他因周期性 T-R ユニットで、少なくとも堆積盆レベルでは対比可能な数万年オーダーのものである。それらは数十万年オーダー（第5オーダー）の PAC シーケンスにまとめられる。PAC の年代スケールは VAIL らのシーケンスよりも細かいので直接の対比はできない。PAC は ELDREDGE and GOULD (1972) の分断平衡進化説に発想を帰するものである。これは堆積基準面が安定している間に上方に埋積が進行して浅海化する時に形成される堆積ユニットからなり、上面が急速な海水準上昇によるシャープな堆積休止面で境される。BUSCH and ROLLINS (1984) も北米アパラチア の上部石炭系~二畳系で数 m (~5 m) 単位で石灰岩と泥岩が繰り返す PAC を示しており、5万~13万年という平均堆積期間の予測値を得ている。

V. シーケンスの境界

シーケンス層序学において、堆積シーケンス境界の把握は堆積相変化の把握とともに重要である。前述のように堆積シーケンスの境界は不整合あるいはその不整合に対比される整合面によって規定される。反射地震断面では上部境界は、侵食性の削剝 (truncation) や top lap パターンで、下部境界は onlap や downlap パターンなどによって表現される (VAIL *et al.*, 1977)。それでは、露頭断面ではその境界は具体的にどのように認定されるのであろうか。

1. シーケンス境界に関わる侵食面

ここで、NUMMEDAL and SWIFT (1987) のシーケンス境界に関わる侵食面の定義を紹介しよう。彼らは、1つは時間間隙の規模に、もう1つは侵食面の物理的成因に基づく、2つの分類システムをあげている。

<時間間隙による分類>

- 1) 不整合 (unconformity): ある岩石のユニットが直上の層序ユニットでない別のユニットに覆われるような、地質学的に本質的な中断。

地域間不整合 (inter-regional unconformity): 地球規模の海水準下降期に形成される、侵食あるいは無堆積の結果による不整合。

- 2) ダイアステム (diastem): わずかな時間間隙を含むだけの相対的に短期間の堆積の中断。

以下の4つのカテゴリーに細分される。

- (a) channel diastem: チャンネル床の側方移動による地域的な侵食面。このダイアステムは通時的。

図1 第2~6オーダーの堆積シーケンス（海進海退ユニット：T-R ユニット）の階層性概念図

BUSCH and WEST (1987) より作成。第3~6オーダーのシーケンスが、上下を大規模な不整合で境された第2オーダーシーケンスにまとめられる。

Fig. 1 Schematic hierarchy of second- to sixth-order depositional sequences (transgressive-regressive units: T-R units) After BUSCH and WEST (1987).

- (b) marine deflation diastem: 海底侵食 (marine scour) による地域的な侵食面。陸棚の sand ridge 間の凹地に形成される。
- (c) offshore marine erosion diastem: 地域的な海底侵食面。陸棚上で大きなストームや潮流を受けて形成される。
- (d-1) marine ravinement diastem: 外浜 (shoreface) の侵食性後退による浅海侵食面で一般に通時的。海進面が過去の陸上侵食面上の河谷や海岸を直接削剝するところでは, ravinement diastem はシーケンス境界を置換する。後浜相や湾の埋積堆積物が削剝されているところでは ravinement surface はシーケンス境界の上位にあるが, その間の年代層序間隔は一般に短い。
- (d-2) bay ravinement diastem: 湾岸の陸側への後退によって削剝された地域的な ravinement surface。外浜の後退による移動を妨げるほど十分に沈降速度が大きい堆積盆でのみ保存される。

<成因的分類>

- 1) 陸上侵食面 subaerial erosion surface: 低海水準期の陸上風化侵食面
- 2) 海進面 transgressive surface: 海底の環境で波浪や水流によって削られた面
 - (a) ravinement surface
 - (b) offshore marine erosion

海水準下降期には, 海退によって今までの陸棚は陸化して侵食の場になるので, 侵食面や下方侵食谷が形成され, これが凹凸の激しい不整合として認定される。海側では陸上侵食面は形成されないで, この不整合面に対比される整合面を追跡することになる。

これに対し, 主に海水準上昇期の海進時に形成される層序 (海進性層序 transgressive stratigraphy: SWIFT, 1968) は, 堆積供給量と海水準上昇速度に依存している。CURRAY (1964) や SWIFT (1968) がまとめたように, 海進には堆積性海進 (depositional transgression) と侵食性海進 (erosional transgression) がある。つまり堆積物供給量が大きい時に, 海水準上昇量がそれを上回る場合には, 沿岸域に堆積作用が卓越した海進がおこる。逆に供給量が小さいと, 海進時の海岸に侵食作用が卓越する。

ここで注目すべき点は, 一般的に海進速度の遅い堆積性の海進では上方深海化の垂直変化を示すのに対し, 海進速度の速い侵食性の海進では沿岸から陸棚に変化する時に波浪などによって外浜侵食 (shoreface erosion) を受けて侵食面を示すことが多い点である (図2)。この境界は ravinement surface (SWIFT, 1968) とか, 海進面 (transgressive surface: RYER, 1977), 海氾濫面 (marine-floodnig surface: VAN WAGONER *et al.*, 1988) などと呼ばれる。この面は広域にわたって平坦である特徴がある。河口相や潟湖相などの沿岸相の上に, この侵食面を介して粗粒堆積物 (ラグ堆積物) と, より細粒な内側陸棚相以深の堆積物がのることが各地の堆積物で報告されている (RYER, 1977; CLIFTON, 1981, 1989; CANT, 1984; READING, 1986; WRIGHT, 1986; NUMMEDAL and SWIFT, 1987)。これは急激な海水準上昇に伴い, 外浜侵食が徐々に陸側に進行することによって形成されたものである (DEMAREST and KRAFT, 1987; 斎藤, 1989a)。したがって, ravinement surface と同時界面は斜交する。つまり, この面は侵食性堆積相境界であって, 海水準下降を意味する堆積シーケンスの境界ではない。したがって, 上下の岩相変化に注意して, この境界と堆積シーケンス境界の不整合とを識別しなければならない。

2. 堆積シーケンス境界と ravinement surface

図3は, 堆積環境ごとの, 堆積体の形態, 粒度, 古水深, 被保存能力を主に海進期の層序にしたがってまとめたものである (DEMAREST and KRAFT, 1987)。つまり, ある特定地点ですべての環境が経過したと仮定した時に保存される理想的な層序を示したものである。したがって, 実際の露頭断面ではここに示したすべての堆積相が保存される訳ではない。陸側より海側に1) 河川 (fluvial), 2) 内湾・沿岸 (paralic), 3) 浅海 (marine) に大別したそれぞれの環境内でも地域的多様性をもつので, 同じシーケンスでもその層序は場所によって様々に異なることが多い。図3右端の堆積物の被保存能力曲線に示されている

図 2 Ravinement surface の通時性の起源

- A : 海水準 1 においてストームがバリアー後背では B1 を、内側陸棚では S1 を堆積させる。海水準が 2 に上昇して海岸線が陸側に移動すると、外浜での波長がもとのバリアーの構造を破壊するが B1 ではバリアー後背相が保存される。
- B : 海進の leading edge に沿う年代層序面は ravinement surface より低角で海盆側に傾く。したがって時間面が侵食面と斜交する。NUMMEDAL and SWIFT (1987) より作成。

Fig. 2 Origin of the diachronous nature of ravinement surface
After NUMMEDAL and SWIFT (1987).

ように、海岸線付近の波食帯から離れた環境の堆積物ほど保存され易い。特に河川や、潮汐水路内のような下方侵食谷内ではよく保存される。また外浜侵食によって削られる沿岸堆積物の量は、海岸地形と海水準変化速度に支配される。

DEMAREST and KRAFT (1987) によれば、アメリカ東海岸の完新統では経験的に、「(1) 垂直シーケンス内の大きな時間間隙やハイエータスは岩相上不明瞭である。(2) 岩相上最も顕著な侵食面は ravinement surface で、環境の急激な垂直変化はそこでおこる。しかしそれは大きな堆積間隙ではない。」という。完新世の ravinement surface は典型的には顕著な侵食性物質境界であり、ラグや掘穴生痕が卓越する。側方にはかなり広域に追跡され、沿岸から陸棚への急激な堆積環境変化を指示する。ravinement surface がシーケンス境界と一致しない時は、前者の方が容易に同定でき、地質学的により重要な面に見える。

ここで堆積シーケンス境界と ravinement surface の問題を図解するために、図 4 (DEMAREST and KRAFT, 1987, fig. 15) のような 2 つの上方浅海化シーケンスからなる柱状図を見てみよう。まず約 3.5 m と 8 m の層準に 2 つの侵食面がある。8 m の侵食面は沿岸から下部外浜への大きな環境変化を指示していることから、古水深カーブが示すように、この面を境にして急激な深海化が想定されている。0 ~ 8 m は外浜相、河川チャンネル/海浜相の上に沿岸相が続く層序となっている。3.5 m の侵食面の上下はいずれも河川チャンネルまたは海浜の斜交層理砂層であり、岩相上の大きな変化は認められない。8 m より

図 3 海進性堆積相層序と各堆積相の分類

DEMAREST and KRAFT (1987) より作成。

Fig. 3 Transgressive stratigraphy and classification system of sedimentary facies
After DEMAREST and KRAFT (1987).

上位は薄い粗粒なラグに続き、ストーム 波浪限界以浅（下部外浜）の厚い砂層、上部外浜の斜交層理砂層、三角州面や沿岸性潟湖の砂層・泥層やピート層、さらに沖積平野の氾濫原砂層が重なる。

この柱状図から I と II の解釈が可能である。両者の大きな違いは、シーケンス境界を 8m の層準の海進面におくか、3.5m の不整合面におくかである。

まず、I（図 4 左端）の解釈は、この層序が 2 つのシーケンスからなり、両者ともに海退相を示し、両者の境界は 8.0m の侵食面（ravinement surface）であるとする考え方である。3.5m の侵食面では大きな堆積環境変化が認められないので、チャンネルの小規模な移動によって形成されたのであろう。この場

図4 仮想的堆積シーケンスと異なる垂直シーケンスモデルに基づく2つの解釈

DEMAREST and KRAFT (1987) より作成。

Fig. 4 A hypothetical depositional sequence with two possible interpretations based on different vertical sequence models

After DEMAREST and KRAFT (1987).

合 ravinement surface とシーケンス境界が同一面となり、海退性ユニットはラグの堆積物を除いて海進性堆積物を介在することなしに次の海退ユニットに覆われることになる。これは(1)海進性の沿岸/浅海堆積物は ravinement surface と不整合とが離れているところにレンズ状に見いだされる、もしくは(2)海進が急速なため海進性堆積物を残すだけの時間がない、という推論を導く。現世堆積物の研究から判断すると、(1)は可能性が期待されるが、(2)は考えにくい。なぜなら、海岸が陸側に移動して外浜侵食を受ける時には、多くの場合ラグをはじめとした侵食堆積物を残すからである (DEMAREST and KRAFT, 1987)。

一方、II (図4右端)の解釈は、0~3.5mの海退性三角州堆積物と3.5~8mの海進性河川成/沿岸成堆積物の間の侵食面を、真のシーケンス境界と考える場合である。3.5mの侵食面は相対的海水準の下降期にできた河谷の下方侵食面と考えられる。3.5~8mは海進の開始期を記録した沿岸成堆積物からなり、上限には外浜侵食による ravinement surface が形成される。上位には海進性海成層が続き、11m以上の部分には海退性の外浜~三角州~沖積氾濫源堆積物が重なる。この解釈は既知の海進・海退過程と整合性があり、海水準や外浜後退のカタストロフィックな変化を考える必要がない。

以上の解釈のうちどちらが正しいかを断定することは、一本の層序断面からだけでは困難であるが、両者とも作業仮説として検証可能である。いずれにしてもある程度広域な堆積物・侵食面の時空的分布がわからないと判断は難しい。

3. 北米大西洋岸の完新統に見るシーケンス境界と ravinement surface

北米大西洋岸の沿岸域は海洋地質の詳細な研究が積み重ねられており、数多くの反射波断面やボーリングコア資料から ravinement surface が認められている。図5は NUMMEDAL and SWIFT (1987) が示

図 5 北米大西洋岸完新統の例にみるシーケンス境界より上位の模式的総合地質柱状図
柱状左の中抜き楔は上方粗粒化（あるいは細粒化）傾向を示す。NUMMEDAL and SWIFT (1987) より作成。

Fig. 5 Schematic stratigraphic columns above sequence boundaries from selected Holocene settings along the United States Atlantic coast
Wedges on the left of columns are coarsening- or fining-upward successions. After NUMMEDAL and SWIFT (1987).

した、完新統において最も普遍的に出現する 6 タイプのシーケンス境界—ravinement surface 間の模式的地質柱状図である。Cを除き、低海水準期の侵食面（不整合）の上位に ravinement surface が保存されている。ravinement surface の直上には、厚さが 0~10m 前後で、粗粒一部礫質な不連続シート状砂層が覆っていることが多い。その砂層は ravinement surface の起伏を反映して峰や谷の起伏をもつ。そして、砂層の上には内側陸棚の厚い泥質堆積物が続くことが多い。

A, B, D, E は、バリアー後背地→バリアー→外洋という環境変化を記録したシーケンスで、最終的に外洋に直面した時に外浜侵食を受けて ravinement surface が形成されている。Cは未だ外洋に直面しておらず、内湾の湾口部どまりであるため、最上部が上方粗粒化で終わっている。Fはミシシッピ川河口沖に位置し、泥質堆積物の供給が多く逆に砂の供給の少ないため外浜が泥からなる。つまり泥の中に ravinement surface が形成される。

一方、上面にはほとんど平坦な ravinement surface を、下面には低海水準期の陸上侵食面をもったバリアー後背地相は、多様な垂直・側方堆積相変化を示す。これは複雑な堆積環境をもった沿岸の海進性堆積システムを反映したものである。（図 3 参照）。

4. 海水準下降とシーケンス境界

VAIL *et al.* (1984) は、ユースタティックな海水準の低下によって生ずる不整合を、タイプ 1 と 2 に分けた。

前者は不整合を境にして堆積環境が全体に海側にシフトする場合であり、侵食域は陸上から海域に及

ぶ。陸棚域は広く陸化して河川による下方侵食などによって侵食域となり、また海底谷の発達などによって海側でも侵食が生ずる。侵食谷には河川や低海水準三角州 (low-stand delta) の堆積物が埋積し、陸棚の前面には海底扇状地や大陸斜面の堆積物が生成する。タイプ1はユースタティックな海水準下降速度が陸棚縁での沈降速度を上回り、結果として相対的に急激かつ大規模な海面低下が生じた時におこる。

タイプ2は、海岸線の後退が陸棚外縁まで達しない中間的位置の場合である。陸棚上部の陸化した部分は陸上侵食を受けるが、河谷侵食は小規模であるため、シーケンス境界での侵食量は少なく、概して平坦な境界となる。タイプ1とは異なり海底侵食は起こらない。この場合のユースタティックな海水準の下降速度は、陸棚縁での沈降速度より小さいが、陸棚中部の沈降速度より大きい。

VAIL らによれば、正確に年代測定をしてみると、タイプ1と2のいずれの不整合も海水準変動曲線の変曲点と一致するので、こうした大きな不整合は地球規模で同時性をもっているという。また、これらの不整合に境された堆積シーケンスは、ユースタティックな海水準変動を反映したものであることから、一つの年代層序単位であるとも言える。

なお、VAIL らの区分に加えて NUMMEDAL and SWIFT (1987) は、第3の不整合のタイプとして海進面が主となる場合を示している。白亜紀の Western Interior では急速に堆積盆が沈降するため（この場合 foreland basin）、海水準は下降を伴わずに一方的に上昇する。このため陸上侵食面を伴わずに、海進面 (transgressive surface) がシーケンス境界の不整合を形成する可能性を指摘している。

VI. おわりに

シーケンス層序学の最近の目を見張るべき進展は、ともすれば記載的であった層序学をダイナミックな地球変動の探求の学問へと昇華させている。階層レベルや保存の程度に差があるにせよ、地層群の層序に残された多くの周期が地球規模の海水準変動を反映していることが明らかになってきた (NUMMEDAL *et al.*, 1987; WILGUS *et al.*, 1988)。日本は変動帯に位置するため地域的な地殻変動を受けており、堆積シーケンスには多様なバイアスが重なっているものと予想される。しかし、地域的な層序から求めた海水準変動を地球規模の変動と対比することから、逆に地域的な地殻変動の性質を推定することも可能となろう。また、地殻変動が大きいことは、堆積盆の規模が小さいこともあいまって、大陸周辺域ではなかなか読みづらい高次のオーダーの解析に適しているとも言える。

小論では層序学、堆積地質学の立場からシーケンスをいくつかの観点に分けてまとめた。露頭断面でのシーケンス認定において特に重要な点は、外浜侵食の産物であり大きな堆積間隙と間違え易い ravinement surface と、低海水準期の陸上侵食を代表するシーケンス境界との区別である。これを正しく理解しないと誤った堆積史をもたらす。つまり、沿岸相と浅海成相の間に ravinement surface がある場合は垂直的变化が急であるが、必ずしも海岸線位置のカタストロフィックな変化を意味するわけではない。いずれにせよ ravinement surface とシーケンス境界面の識別のためには、多くの境界面の事例や堆積モデルを検討する必要がある。

謝辞：東京大学総合研究資料館の歌田 実助教授には投稿に当たって助言を頂いた。地質調査所海洋地質部の斎藤文紀氏からは、小論の執筆を勧めて頂きいくつかのご教示を受けた。また、筑波大学増田 富士雄博士には野外巡検の折に多くの情報を提供していただいた。厚く御礼申し上げたい。

文 献

- 安藤寿男 (1990 a) : 上部白亜系中部蝦夷層群三笠層の層序と浅海堆積相。地質学雑誌, 96, 279-295。
安藤寿男 (1990 b) : 上部白亜系中部蝦夷層群三笠層の堆積相分布と前進性シーケンス。地質学雑誌, 96, 453-469。
BATES, R. L. and JACKSON, J. A. (1987) : *Glossary of geology*. 3rd. ed. Amer. Geol. Inst., 788 p.

- BOUMA, A. H. (1962): *Sedimentology of some flysch deposits*. Elsevier, Amsterdam, 169 p.
- BUSCH, R. M. and ROLLINS, H. B. (1984): Correlation of Carboniferous strata using a hierarchy of transgressive-regressive units. *Geology*, **12**, 471-474.
- BUSCH, R. M. and WEST, R. R. (1987): Hierarchical genetic stratigraphy: a framework for paleoceanography. *Paleoceanography*, **2**, 141-164.
- CANT, D. J. (1984): Development of shoreline-shelf sand bodies in a Cretaceous epeiric sea deposits. *J. Sed. Pet.*, **54**, 541-556.
- CHANG, K. H. (1975): Unconformity-bounded stratigraphic units. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**, 1544-1552.
- CLIFTON, H. E. (1981): Progradational sequences in Miocene shoreline deposits, southeastern Caliente Range, California. *J. Sed. Pet.*, **51**, 165-184.
- CLIFTON, H. E. (1989): Stratigraphic sequence response to glacio-eustatic fluctuations in a rapidly subsiding Late Cenozoic Basin, San Francisco, California. In MORTON, R. A. and NUMMEDAL, D. eds.: *Shelf sedimentation, shelf sequences and related hydrocarbon accumulation*. Proc. 7th. Ann. Res. Conference, Gulf Coast Sec., Econ. Paleont. Mineral. Foundation, 203-211.
- CURRAY, J. R. (1964): Transgressions and regressions. In MILLER, R. L., ed.: *Papers in marine geology*. Shepard Commemorative Volume, Macmillan Pr., New York, 175-203. In SWIFT, D. J. P. and PALMER, H. D. eds. (1978): *Coastal sedimentation*. Benchmark Papers in Geology, **42**, Hutchinson and Ross, Dowden, 97-125.
- DEMAREST, II, J. M. and KRAFT, J. C. (1987): Stratigraphic record of Quaternary sea levels: implications for more ancient strata. In NUMMEDAL, D. et al. eds.: *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., **41**, 223-239.
- DOTT, R. H., Jr. and BOURGEOIS, J. (1982): Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **93**, 663-680.
- ELDRIDGE, N. and GOULD, S. J. (1972): Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism. In SCHOPF, T. J. M., ed.: *Models in paleobiology*. Freeman, San Francisco, 82-115.
- GOODWIN, P. W. and ANDERSON, E. J. (1985): Punctuated aggradational cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. *J. Geol.*, **93**, 515-533.
- HANCOCK, J. M. (1975): The sequence of facies in the Upper Cretaceous of northern Europe compared with that in the Western Interior. *Geol. Assoc. Canad. Spec. Pap.*, **13**, 83-118.
- HAQ, B. U., HARDENBOL, J. and VAIL, P. R. (1988): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In WILGUS et al. eds.: *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. Publ., **42**, 71-108.
- HECKEL, P. H. (1977): Origin of phosphatic black shale facies in Pennsylvanian cyclothems of midcontinent North America. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **61**, 1045-1068.
- HECKEL, P. H. (1986): Sea-level curve for Pennsylvanian eustatic marine transgressive-regressive depositional cycles along midcontinent outcrop belt, North America. *Geology*, **14**, 330-334.
- JAMES, D. P. and LECKIE, D. A. eds. (1988): *Sequences, stratigraphy, sedimentology: surface and subsurface*. Canad. Soc. Petrol. Geol. Mem., **15**, 586 p.
- KAUFFMAN, E. G. (1977): Geological and biological overview: Western Interior Cretaceous basin. *Mountain Geologist*, **14**, 75-99.
- 増田富士雄 (1989): 過去6億年内の気候変動に見る周期——酸素同位体変遷史と地球系の同時摂動. 科学, **59**, 455-463.
- MITCHUM, Jr., R. M. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. In PAYTON, C. E. ed.: *Seismic stratigraphy—Application to hydrocarbon exploration*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem., **26**, 205-212.
- MOORE, R. C. (1933): *Historical geology*. McGraw Hill, New York, 656 p.
- MOORE, R. C. (1936): Stratigraphic classification of the Pennsylvanian rocks of Kansas. *Kansas State Geol. Surv., Bull.*, **22**, 256 p.

- NORTH AMERICAN COMMISSION ON STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE (1983): North American Stratigraphic Code. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **67**, 841-875.
- NUMMEDAL, D. and SWIFT, D. J. P. (1987): Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: Some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. In NUMMEDAL, D. *et al.* eds.: *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., **41**, 241-260.
- NUMMEDAL, D., PILKEY, O. H. and HOWARD, J. D. eds. (1987): *Sea level fluctuation and coastal evolution*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., **41**, 260 p.
- NUMMEDAL, D., SWIFT, D. J. P. and KOFRON, B. M. (1989): Sequence stratigraphic interpretation of Coniacian strata in the San Juan Basin, New Mexico. In MORTON, R. A. and NUMMEDAL, D. eds.: *Shelf sedimentation, shelf sequences and related hydrocarbon accumulation*. Proc. 7th. Ann. Res. Conference, Gulf Coast Sec. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Foundation, 175-202.
- OWEN, D. E. (1987): Commentary: usage of stratigraphic terminology in papers, illustrations, and talks. *J. Sed. Pet.*, **57**, 363-372.
- RAMSBOTTOM, W. H. C. (1979): Rates of transgression and regression in the Carboniferous of northwest Europe. *J. Geol. Soc. Lond.*, **136**, 147-153.
- READING, H. G. ed. (1986): *Sedimentary environments and facies*, 2nd. ed. Blackwell Sci. Publ. Oxford, 615 p.
- RYER, T. A. (1977): Patterns of Cretaceous shallow-marine sedimentation, Coalville and Rockport areas, Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **88**, 177-188.
- 斎藤文紀 (1989a): 陸棚堆積物の区分と暴風型陸棚における堆積相. 地学雑誌, **98**, 350-365.
- 斎藤文紀 (1989b): 海進・海退, 海水準変動と堆積相. 堆積学研究会報, **31**, 49-54.
- SALBADOR, A. (INTERNATIONAL SUBCOMMISSION ON STRATIGRAPHIC CLASSIFICATION) (1987): Unconformity-bounded stratigraphic units. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **98**, 232-237.
- SILBERLING, N. J. and ROBERTS, R. J. (1962): Pre-Tertiary stratigraphy and structure of north-western Nevada. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **72**, 58p.
- SLOSS, L. L. (1963): Sequences in the cratonic interior of North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **74**, 93-114.
- SLOSS, L. L., KRUMBEIN, W. C. and DAPPLES, E. C. (1949): Integrated facies analysis. In LONGWELL, C. R. ed.: *Sedimentary facies in geologic history*. Geol. Soc. Am. Mem., **39**, 91-124.
- SWIFT, D. J. P. (1968): Coastal erosion and transgressive stratigraphy. *J. Geol.*, **76**, 444-456.
- VAIL, P. R., MITCHUM, Jr. R. M., TODD, R. G., WIDMIER, J. M., THOMPSON III, S., SANGREE, J. R., DUBB, J. N. and HATLELID, W. G. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In PAYTON, C. E. eds.: *Seismic stratigraphy—Application to hydrocarbon exploration*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem., **26**, 49-212.
- VAIL, P. R., HARDENBOL, J. and TODD, R. G. (1984): Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy. In SCHLEE, J. S. ed.: *Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem., **36**, 129-144.
- VAN WAGONER, J. C., POSAMENTIER, H. W., MITCHUM, Jr. R. M., VAIL, P. R., SARG., J. F., LOUTIT, T. S. and HARDENBOL, J. (1988): An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In WILGUS, C. K. *et al.* eds.: *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., **42**, 39-46.
- 和達清夫 編 (1987): 海洋大事典. 東京堂出版. 589 p.
- WALKER, R. G. (1978): Deep water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **62**, 932-966.
- WALKER, R. G. ed. (1984): *Facies models*, 2nd. ed. Geol. Assoc. Canada, 317 p.
- WANLESS, H. R. and WELLER, J. M. (1932): Correlation and extent of Pennsylvanian cyclo-

- thems. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **43**, 1003-1016.
- WILGUS, C. K., HASTINGS, B. S., KENDALL, C. G. St. C., POSAMENTIER, H. W., ROSS, C. A. and VAN WAGONER, J. C. eds. (1988): *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., **42**, 407 p.
- WRIGHT, R. (1986): Cycle stratigraphy as a paleogeographic tool: Point Lookout Sandstone, southeastern San Juan basin, New Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **96**, 661-673.

(1989年12月18日受付, 1990年2月19日受理)