

シーケンス層序学入門

Sequence stratigraphy: an introduction

酒井哲弥* 斎藤文紀**
増田富士雄***Tetsuya Sakai* Yoshiki Saito**
and Fujio Masuda***

1994年10月5日受付.

1995年4月14日受理.

* 大阪大学理学研究科.
Graduate School of Science, Osaka University,
Toyonaka, Osaka 560, Japan** 地質調査所海洋地質部.
Marine Geology Department, Geological Survey
of Japan, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*** 大阪大学理学部宇宙地球科学科.
Department of Earth and Space Science, Faculty
of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka
560, Japan

はじめに

1980年代後半に現われたシーケンス層序学が、近年、日本の地質学でも盛んにとりいれられるようになってきた。シーケンス層序学はP.R. Vailを中心とした“エクソングループ”が、主に石油地質学の分野で行なわれていた震探（音響）層序学を、新しい層序学として体系化したものである。シーケンス層序学では成因的に関連したユニットに基づいて地層を区分するという新しい方法を取っている。ここではシーケンス層序学が、どのようなものであるかを簡単に紹介する。まず、シーケンス層序学で使われる地層のユニットについて説明し、その成因について議論する。なお、この解説文はシーケンス層序学の基礎を紹介した論文や論文集、Wilgus et al. (1988), Bally (1989), Van Wagoner et al. (1990), Wilson (1992)に基づいて作成したものである。なお、シーケンス層序学に関する用語の日本語訳については、現在のところ統一されていない。この論文で使われている主な用語は基本的に、増田 (1993) に従った。なお、この解説文で使われている用語が必ずしも普及している訳でないことを最初に明記しておく。

シーケンスの基本ユニット

シーケンス層序学では地層を階層的に区分する。それぞれの区分は厚さによって分けられ、その範囲はmmスケールのもからkmスケールのもまでである。それらはラミナ (Lamina), ラミナセット (Lamina Set), ベッド (Bed), ベッドセット (Bed Set), パラシーケンス

Abstract

Sequence stratigraphy was developed by members of the EXXON Research and Product company in late 1980's. In this paper, the general concept of sequence stratigraphy is presented. In particular, the internal architecture of depositional sequence and its components are described, and the effects of eustatic control on the depositional stratal pattern is discussed.

Key words: sequence stratigraphy, systems tract, parasequence, accommodation

(Parasequence), パラシーケンスセット (Parasequence Set), シーケンス (Sequence) と呼ばれている (Campbell, 1967; Van Wagoner et al., 1988). ここではこれらの区分単位のうち、パラシーケンス, パラシーケンスセット, シーケンスといった, ユースタシー (絶対的sea level) などの, 広域的で汎世界的な要素の影響を受けてできた地層について説明する。ベッドセットまでの区分単位の特徴は表1にまとめてある。パラシーケンスより厚い区分単位は地層の側方への連続性, それを分ける境界面の形状, 累重様式, 内部の地層の側方変化などに基づいて定義される (Van Wagoner et al., 1990). 比較的厚い地層を区分する場合には境界面の上下の堆積相や堆積相解析の結果が重要である。

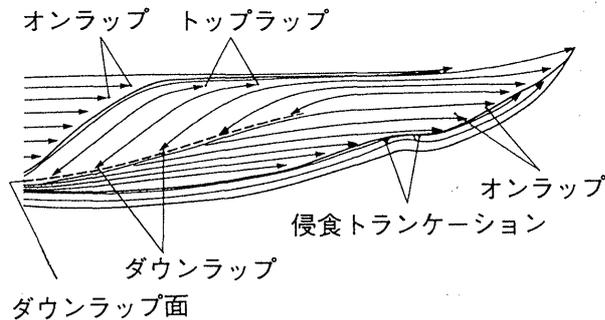
最初にシーケンスの特徴について説明する。シーケンスについて最初に触れる理由は、シーケンス層序学の前身である震探層序学という堆積盆スケールの広域的な地層の解析から、どのようにしてシーケンス層序学が発達していったかを理解するためである。

シーケンス

震探断面でシーケンス (堆積シーケンス) を認定するときには、不連続面が大事な鍵を握る。不連続面は震探断面で反射波が途切れるところとして認定できる。シーケンスの基底には2つのタイプの地層の重なり方 (ラッピング・パターン), オンラップ (Onlap) とダウンラップ (Downlap) が認められる (第1図)。オンラップは下位のシーケンス境界に見られる特徴的なラッピングのパターンで、侵食面の上に地層が水平に重なった所などで

第1表. 地層のユニットの定義とその特徴 (Campbell, 1967).

地層のユニット	定義	ユニットの特徴	堆積過程	境界面の特徴
ベッドセット (Bed Set)	●同一の成因で形成され、整合的に重なるベッドの集合。 ●ベッドセット面と呼ばれる侵食や無堆積によってできた面、およびその延長面で境される	●1つのベッドセット内のベッドの構成や構造、あるいは、堆積構造が、上下のベッドセットと異なる。	●短期的あるいは周期的な作用による (ベッドの頂を見よ)。	●基本的にはベッドと同じ。 ●ベッドセットやベッドセット面はベッドよりも長期間かけて形成される。 ●層理面よりも空間的に大きな広がりを持つ。
ベッド (Bed)	●同一の成因で形成され、整合的に重なるラミナ、あるいはラミナセット。 ●層理面と呼ばれる侵食や無堆積でできた面、およびその延長面。	●全てのベッドがラミナセットを含むとは限らない。	●短期的あるいは周期的な作用による。 ●短期的な堆積作用には、ストーム、洪水、土石流、乱泥流などがある。 ●周期的な堆積作用には季節変化、気候変化などがある。	●短期間に形成される (秒から年オーダー)。 ●新・旧の層を分ける。 ●層理面を境に堆積相が変わる。 ●条件が良いと、年代層序の構築に役立つ。 ●ベディング面の形成時間は多くの場合、ベッドの形成時間より長い。 ●空間的な広がりには大小さまざまである。
ラミナセット (Lamina Set)	●同一の成因で形成され、整合的に重なるラミナの集合。 ●ラミナセット面と呼ばれる、侵食や無堆積によってできた面、およびその延長面で境される。	●整合的に重なるラミナ群で、ベッド内部で、特徴的な構造を示す。	●短期的に堆積。 ●ウェーブ・カレント・リップルベッド、タービダイト、ハンモック状斜交層理のリップル葉理部、バックフローリップル、フォアセットの斜面下部のリップル葉理などがこの例。	●急速に形成される (秒から日のオーダー)。 ●ベッド境界よりも空間的な広がり狭い。
ラミナ (Lamina)	●肉眼で識別できる最も薄い層。	●内部構造は一樣。 ●内部に層構造は見られない。	●短期で堆積。	●非常に速く形成される (秒から時間オーダー)。 ●ベッド境界よりも空間的な広がり狭い。



第1図. 震探断面で見られる特徴的な反射面の末端部のパターン (Mitchum et al., 1977)

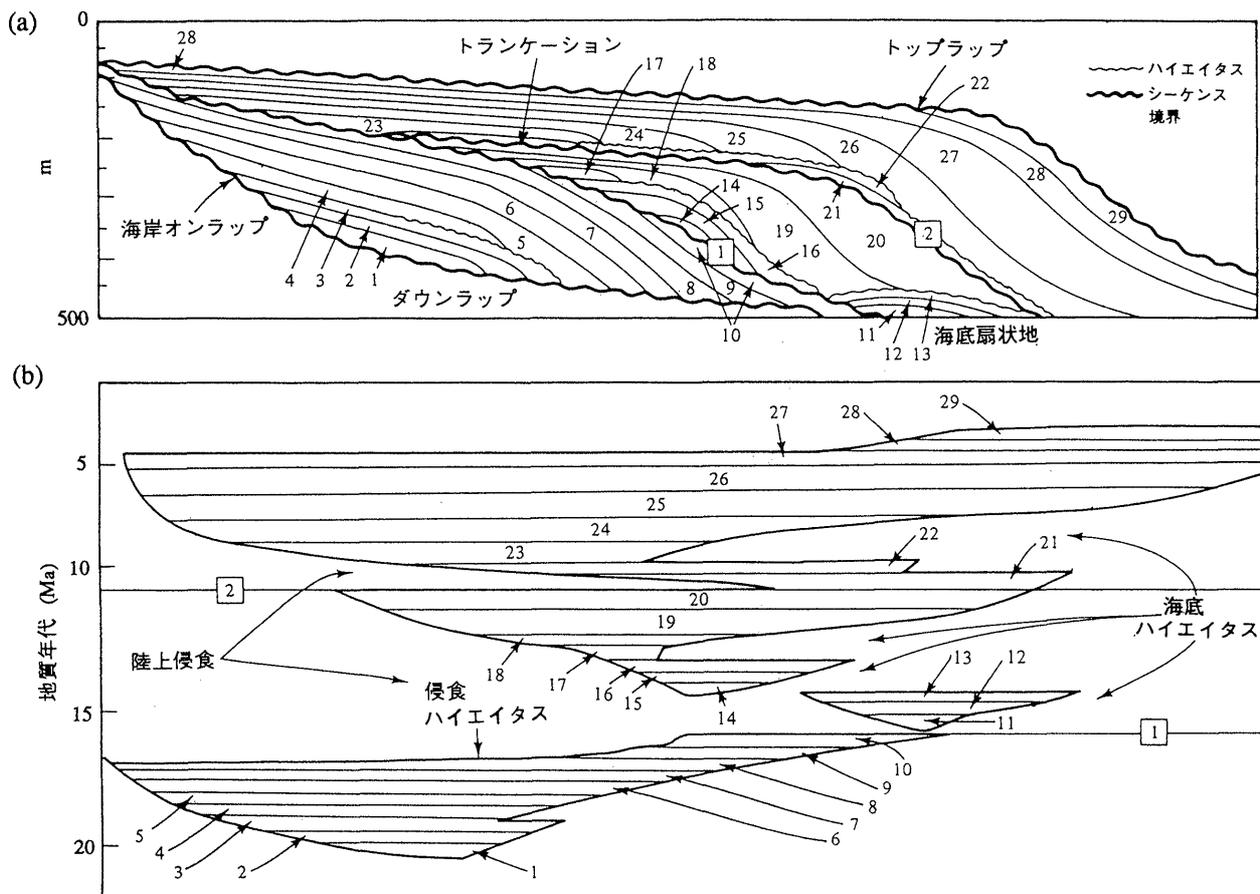
見られる。例えば、浅海成堆積物が非海成層の上にオンラップしている場合、これは海水準が上昇したことを示している。ダウンラップはデルタの前置面のように、もともと傾いた地層が斜面下向きの方で、古い時代の地層と斜交している不連続関係のことをいう。

上位のシーケンス境界に見られるラッピング・パターンはトップラップ (Toplap) と侵食トランケーション (Erosional Truncation) である。トップラップはもともと傾いた地層が斜面上向きの方で切られているパターンで、地層のラップアウトする位置が連続的に沖側に移動していくのが特徴である。これは陸棚上で無堆積であったり、堆積物がバイパスしたり、小規模な侵食があったことの証拠となる。トップラップしている地層を沖側に追跡していくと、下位の地層にダウンラップしていることが多い。

侵食トランケーションは、地層がその上位の不連続面に切られているパターンで、地層の削剝によって作られる。侵食トランケーションは広域的に見られる場合とチャネルなど、ごく限られた地域に見られる場合がある。構造運動で傾いた地層の場合、傾斜の上向きの方で陸上、あるいは海底での侵食作用によって地層が削剝されてこのパターンが作られる。

露頭断面でも、震探断面でもシーケンスを認定する場合は、“上下を不整合で区切られ、一連の成因で形成された、整合的に重なる地層”という定義に基づいておこなわれる。Mitchum et al. (1977) は不整合を、“古い地層と若い地層を分ける面で、侵食、あるいは無堆積の証拠が見られ、大きなハイエイタスが見られるもの”と定義した。この定義では海氾濫面も不整合に含まれてしまうため、シーケンス境界と後述べるパラシーケンス境界 (すなわち海氾濫面) とをはっきりと区別することができない。そこで、シーケンス層序学では不整合は“古い地層と若い地層を分ける面で、侵食や陸上への露出の証拠があり、その延長の海底では侵食の証拠が見られ、大きなハイエイタスが見られるもの”という定義を用いる。一方、蛇行河川での流路の蛇行、ポイントバーの形成のように、堆積と侵食が異なる地点で同時に発生するような地層形成プロセスでできる侵食面は、不整合には含まれない。

第2図は3つのシーケンスの重なりを模式的に描いたものである。それぞれの境界は□と◇で表されている。第2図(a)の地質断面に示してあるように、これらのシーケンスは29の地層ユニットから構成されている。第2図



第2図. タイプ1およびタイプ2のシーケンス境界で区切られた3つのシーケンス (Wilson, 1992). (a) 層序断面図. それぞれのユニットの幾何学的な関係を示している. (b) 時間層序断面図. それぞれのユニットの時空分布を表している.

(b) は第2図 (a) のユニットの時間層序断面である. 第2図 (a) ではユニットの空間分布が, 第2図 (b) では地層の時間分布が表現されている.

ここで第2図 (a) のシーケンス境界に注目してみよう. 図の一番左側ではユニット28がユニット8の上位に直接重なっている. 図の中央部ではユニット14がユニット10の上位に重なっている. そして境界の最も右側ではユニット10の上位にユニット11 (海底扇状地堆積物) が重なっている. この部分では境界を挟んだ上下の地層の間で時間間隙が見られない. 図の左側では不整合であった境界が図の最も右側では整合に変化している. 従って, ここで正確なシーケンス境界の形成年代を決定することができることになる. すなわちシーケンス境界はユニット10とユニット11の間で形成されたわけである. こうしたことから, 時間間隙, すなわちハイエイタスは陸上でも海底でも形成されることが読み取れる.

シーケンス境界は大部分が整合となっている. 境界が大きく傾いている部分ではユニット21とユニット20が接している. シーケンス境界に時間間隙が見られるのは, ユニット20とユニット22が接する, 境界が緩く傾いた部分に限られている. しかしここでも上下の地層が大きく斜交する不連続面にはなっていない. シーケンス境界の

正確な形成年代は, 境界と同様に境界の整合部分から知ることができる. ここではユニット20とユニット21の間でシーケンス境界が形成されたということである.

各シーケンスの形成年代は場所によって違っているが, 大きく見ると, 地質時代のうちのある時間内で形成されている. このことから堆積シーケンスは時間層序学的な意味を持つことになる.

第2図のシーケンス境界と図ではその形態の違いがはっきりしている. そこで, 下位のシーケンス境界でシーケンスをタイプ分けをする (Van Wagoner et al., 1988). どちらのタイプの境界かは, 地層のオンラップする位置の移動が関係している.

タイプ1のシーケンス境界は海岸オンラップ (Coastal Onlap) の位置が陸棚縁よりも沖側に移動していくものをいう. このため, 陸棚域は陸域となって侵食が起り, 河川によって谷が削られ, それを通して多くの堆積物が堆積盆方向へ供給される. また, これにともなって陸棚斜面には海底谷が形成される. この海底谷の先では海底扇状地が発達する. したがって, タイプ1のシーケンス境界は地表および海底で形成される. タイプ2のシーケンス境界は, 境界上の地層のオンラップする位置が陸棚縁よりも沖側に移動しないものをいう. ここでは顕著な

侵食はおこらない。

タイプ1のシーケンス境界は海水準の急速で、大きな低下に伴って形成される。これに対して、タイプ2のシーケンス境界はゆっくりとした、小さな海水準の低下によって形成される。このようにシーケンス境界のタイプを識別することによって、海水準変動の特徴を大まかに知ることができる。

シーケンスの形成に影響する海水準変動は、1回の変動が数億年スケールになるものから、数10万年スケールのものまでである。海水準変動は時間スケールごとに、いくつかのオーダーに区分される(表2)。一般に、シーケンスという用語は、このうちの第3オーダーよりも低次の海水準変動の影響を受けてできたものに対して使う。

こうした様々なオーダーの海水準変動の起源は、長周期の変動は構造運動に、短い周期のものは氷河の消長にその原因が求められている。具体的に見てみると、第1オーダーは超大陸の形成や分裂、第2オーダーは中央海嶺の体積の変化、第3オーダーはプレート間の応力の変化、第4・第5オーダーは地球の公転軌道の変化、地軸の傾きの変化などの地球の回転や軌道の変動に対応した氷河の消長によると考えられている(Vail et al., 1991)

堆積空間の概念

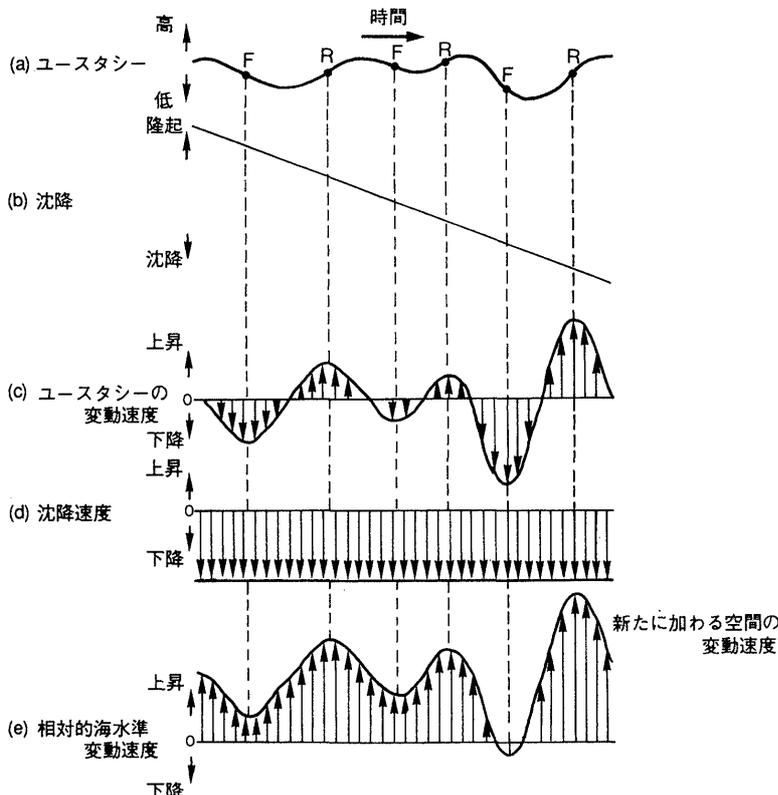
陸棚上で堆積物は海底と海面との間の空間を埋めていく。シーケンス層序学では、この堆積物で埋めることが可能な空間のことを堆積空間(Accommodation; Posamentier et al., 1988)という。構造運動やユースタシー

の影響によって、堆積空間は変化する。堆積空間がどのように埋積されるかは、相対的海水準変動との関係で求められる。相対的海水準変動が一定、あるいはゆっくりと上昇している場合、堆積システムは沖側に前進する。新たな堆積空間は相対的海水準の上昇によって付け加わる。この場合、堆積システムは上方に積み重なる。このように相対的海水準変動の上昇速度の違いによって堆積システムが前進するか、累積するかが決まる。

第2図のシーケンスではダウンラップ面(Downlap Surface; Van Wagoner et al., 1988)が内部に見られるが、これはユースタシーの変化速度に対応してできたものである。ダウンラップ面は堆積システムの前進によって形

第2表. 海水準変動のオーダー区分(Vail et al., 1991).

オーダー	期間
1	50Ma~
2	3 ~ 50Ma
3	0.5 ~ 3Ma
4	0.08 ~ 0.5Ma
5	0.03 ~ 0.08Ma
6	0.01 ~ 0.03Ma



第3図. ユースタシー、テクトニックな沈降と堆積空間の関係。ユースタシーとテクトニックな沈降が、あらたに付け加わる堆積空間の形成速度に影響する(Posamentier et al., 1988)。

成される。これは海退を記録しており、相対的海水準変動の上昇速度が遅くなったことを意味している。第2図ではユニット22とユニット23~26との境界がそれに相当する。

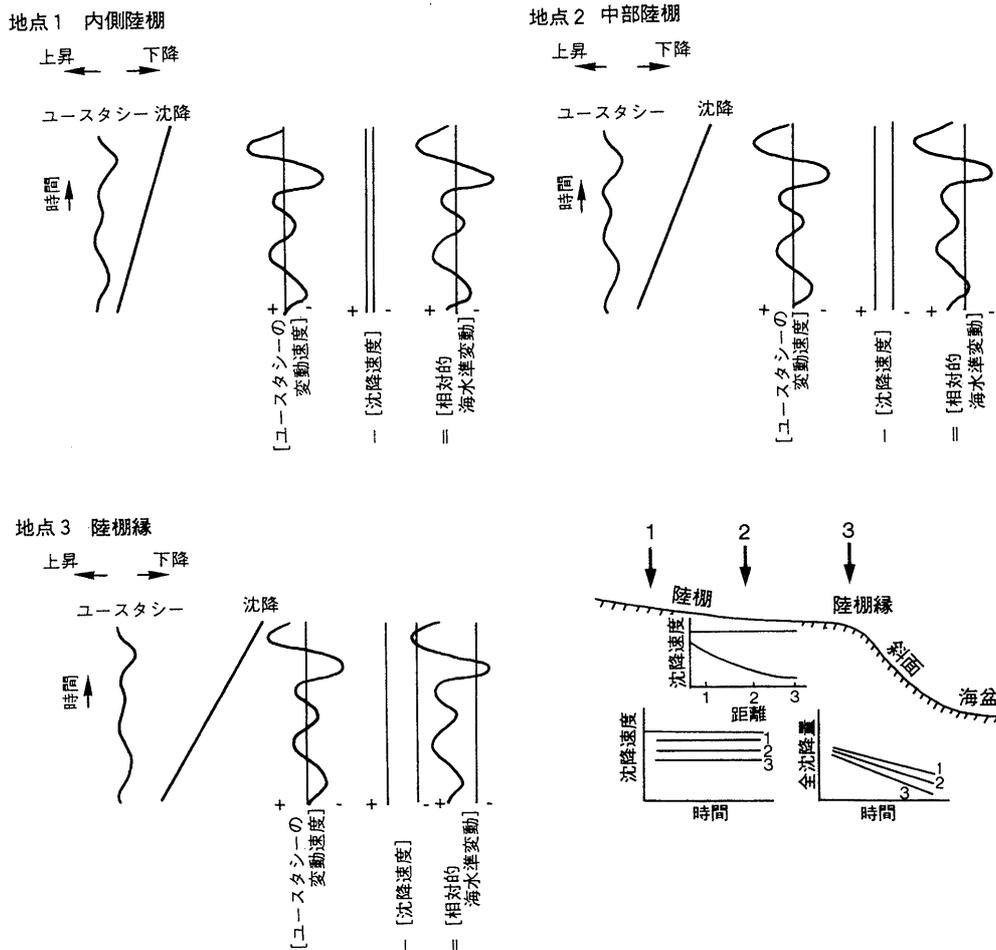
このダウンラップ面はコンデンス・セクション (Condensed Section; Loutit et al., 1988) と関係していることが多い。コンデンス・セクションは堆積速度がたいへん遅くなった時期にできた薄い地層で、海緑石、燐灰石などの自生鉱物が多く含まれることなどが特徴である。堆積速度が遅いコンデンス・セクションには、生層序でいう多くの化石帯が含まれており、ときには1つの階 (Stage) が含まれることさえある。コンデンス・セクションは海底でのハイエイタスの指標となる。露頭の研究から、コンデンス・セクションは相対的海水準の上昇速度が堆積物の供給速度よりもはるかに速い時にできることがわかった。この時には堆積の中心は陸側に移動し、沖側では堆積速度がさらに遅くなる。

Vailらの研究グループはユースタシーが堆積空間の形成あるいは減少速度に大きく影響を与えると主張している。第3図 (a) は理想的なユースタシー変動曲線を表し

ている。曲線上のF, Rは、それぞれ曲線の下降および上昇の変曲点を表している。変動曲線の下はテクトニックな沈降を表す。この沈降曲線は10Maよりも長い時間スケールでは指数関数となるが、1~10Ma程度のスケールでは、直線で近似することができる (Watts, 1992; Wilson, 1992)。ユースタシーの変動速度曲線 (c) と沈降速度曲線 (d) を重ね合わせ、相対的海水準変動の変化速度を表したものが第3図 (e) である。この曲線からは、相対的海水準はほとんどの間、上昇し続けていることが分かる。言いかえると堆積空間はほぼ連続的に作られているわけである。変曲点Fでは新たに形成される堆積空間は最小で、変曲点Rでは最大となる。

大陸縁地域の堆積盆では場所によって沈降速度が異なる (第4図)。それぞれの場所のユースタシーと沈降曲線の合成曲線を比較してみると、相対的海水準の低下は沈降量の小さい陸側 (第4図の地点1) ほどはっきり現れる。

ユースタシーの変動は、必ずしも単純な変動の繰り返りで表現できるとは考えられない。Vailらの研究グループはユースタシーの変動に階層性があることを発見した (第10図)。シーケンスおよびシーケンス内部に見られる



第4図. 陸棚上で堆積空間の形成および削除の速度がどのように変化するかを模式的に描いた図。ここで注目されるのは陸棚縁で堆積空間が減少すると、その減少量は内側陸棚では陸棚縁よりもさらに大きくなることである (Posamentier and Vail, 1988)。

パラシーケンスは第3～第5オーダーのユースタシーの変動の影響を受けて形成されたと考えられている。これらの曲線を重ね合わせることによってより複雑な曲線となる(第10図)。次にその曲線に、沈降曲線を重ね合わせて相対的な海水準変動曲線を描いてみる。この曲線上で堆積空間が減少するときは、曲線が右下に落ち込んでいくときである。この時には陸棚で侵食が起こる。

堆 積 体

堆積空間の概念を使うと堆積物の供給量を仮定することによって、堆積盆の埋積過程をシミュレートすることができる。海水準変動曲線の変曲点ではその変化速度が最も大きくなる。タイプ1、タイプ2のシーケンス境界と相対的な海水準の低下との関係を第5図で見よう。

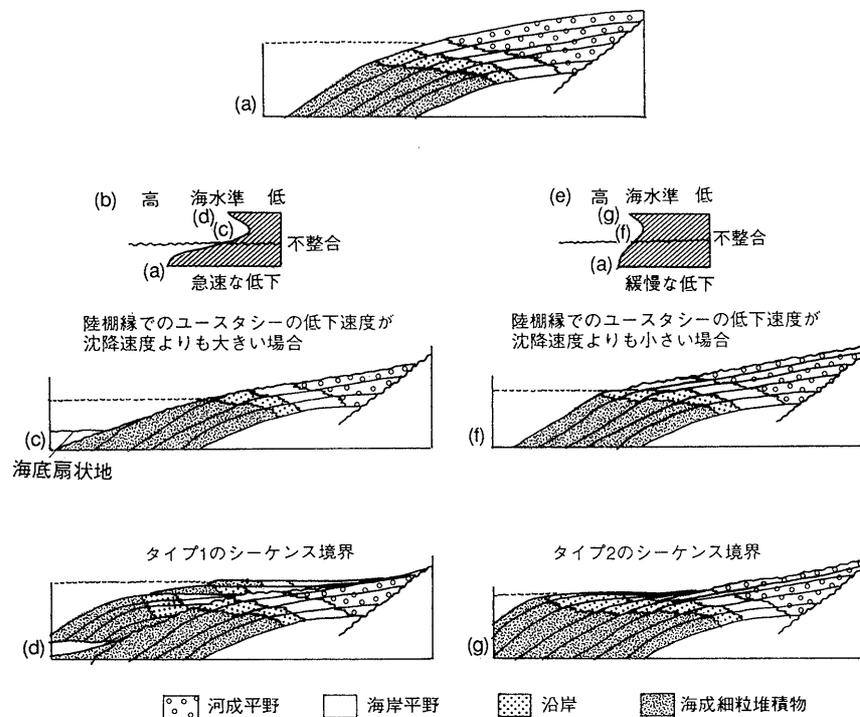
タイプ1のシーケンス境界は堆積空間が急速に減少したときに形成される。この時には大きく海水準が低下するため、陸上での侵食作用により、下位の地層が大きく削り取られる。そのため、このタイプのシーケンス境界を境にして、外浜の砂岩や陸棚の泥岩など、より深い環境の堆積物が、網状流河川やエスチュアリー堆積物などの陸成層やごく浅い環境を示す海成層に直接覆われる。ここではこれらの中間の環境の堆積物は見られない。露頭やコアなどではこうした堆積環境のギャップが、このタイプのシーケンス境界を認定する1つの基準になる。タイプ1のシーケンス境界の上位では、海盆側に海底扇

状地が発達する(第5図)。これは海水準が陸棚縁よりも低下したときに、陸棚で侵食された物質が海底に運ばれて形成されたものである。

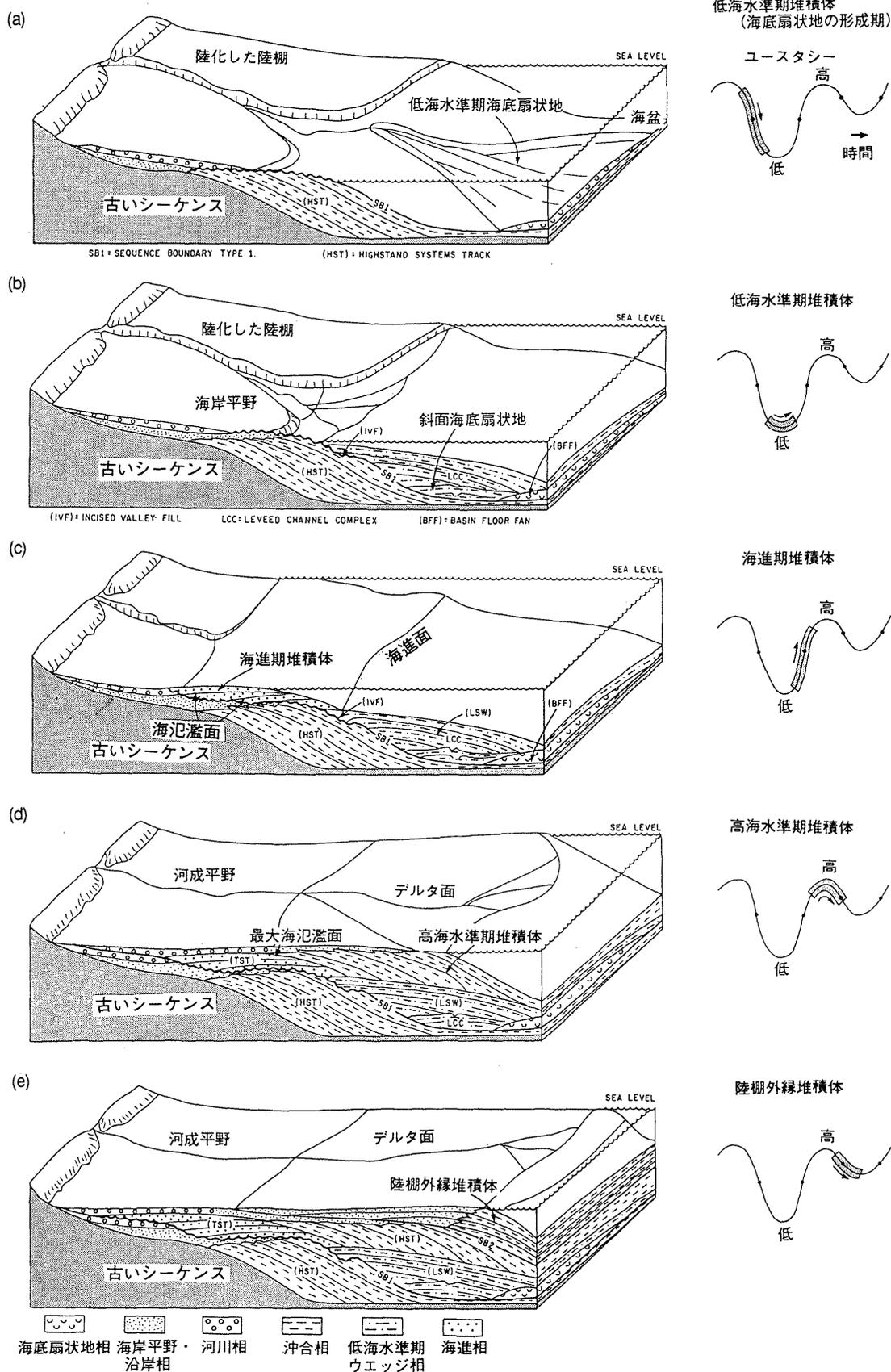
タイプ2のシーケンス境界は陸上への露出、海岸オンラップの位置の堆積盆方向への移動で特徴づけられる。しかし、これにはタイプ1のシーケンス境界に見られたような、規模の大きな陸上での侵食の証拠や堆積盆方向への堆積相の分布の移動は見られない。タイプ2のシーケンス境界はユースタシーの低下速度が堆積盆の沈降速度よりも小さい時に形成されると解釈されている。従って、ここでは相対的な海水準の低下は起こらない。

ここで、河川堆積物を例に、地層が保存される時期と海水準変動の関係をみてみることにする。河川堆積物は海水準が上昇するときに、低海水準期に削り込んだ谷を埋積するため、開析谷の中に保存される。これは高海水準期に、海水準が低下し始める時にも地層として保存される。

このように海水準変動と地層形成の関係を一般化することによって、震探断面で認められたシーケンス内部の堆積相の特徴を推定することができる。この方法はエクソン社の研究者らの手によってしだいに洗練されてきた。彼らは海水準が変動する過程で、海水準変動のある決まった時期にできた堆積システムの集合体を1つのユニットとすることを提唱し、それを堆積体(Systems Tract)と名付けた。今のところ、4つの堆積体に分けられており、



第5図. タイプ1とタイプ2のシーケンス境界とそれを形成する海水準変動。(a) 高海水準期での地層の形成の様子。(b)-(d) タイプ1のシーケンス境界が形成される様子。タイプ1のシーケンス境界は海水準の低下速度が速く、海岸線が陸棚縁よりも低下するときに形成される。(e)-(g) タイプ2のシーケンス境界が形成される様子。タイプ2のシーケンス境界は海水準の低下速度が遅く、海岸線が陸棚縁よりも低下しない時に形成される(Wilson, 1992)。



第6図. 低海水準期 (a, b), 海進期 (c), 高海水準期 (d), 陸棚外縁堆積体 (e) の特徴およびユースタシーのどの段階で形成されるかを簡単に図示したもの (Haq, 1991).

それぞれ低海水準期堆積体 (Lowstand Systems Tract), 海進期堆積体 (Transgressive Systems Tract), 高海水準期堆積体 (Highstand Systems Tract), 陸棚外縁堆積体 (Shelf Margin Systems Tract) と呼ばれる。

低海水準期堆積体はさらに2つのステージに分けて, その発達を見てみることにする。海盆底海底扇状地 (Basin Floor Fan) は相対的の海水準が陸棚縁よりも低下した時に形成される。この時, 陸棚は完全に地表に露出し, 河川が谷を削る (第6図a)。堆積物は陸棚をバイパスして陸棚斜面へ直接供給される。堆積物は乱泥流として斜面を流れ下り, 海盆底で堆積する。

次に, 海水準の低下速度が遅くなると, 陸棚縁では沈降速度が海水準の低下速度を上回るようになる。すなわち海水準が低下から上昇に転ずる。この時に開析谷は埋積され (Incised-Valley Fill), 以前には海底谷が発達していた場所でデルタ (Lowstand WedgeあるいはLowstand Delta) が前進を始める (第6図b)。デルタの前部では陸棚斜面の傾斜が大きくなるため, 一度堆積した堆積物が海底土石流や乱泥流となって輸送され, 自然堤防・流路システム (Channel-levee System) がデルタの沖に形成される。これを斜面海底扇状地 (Slope Fan) と呼ぶ。その後も海水準は上昇を続けるため, 斜面の傾斜はゆるくなり, 斜面海底扇状地は前進をする。この時期には堆積物の供給速度が海水準の上昇速度を上回っているかぎり, 堆積システムは前進を続ける。相対的の海水準の上昇速度が大きくなり, 堆積空間の形成速度が堆積物の供給速度を上回るようになると, 堆積システムの前進は止まり, この堆積体の形成は終わる。したがって, 低海水準期堆積体は下位はシーケンス境界で, 上位は海進面 (Transgressive Surface) によって区切られる。海進面はシーケンス内部で, 陸棚での最初の海氾濫面である。

海進期堆積体 (第6図c) は相対的の海水準の上昇速度が大きい時に形成される。海水準の上昇に伴って陸棚は海面下に沈み, 河川は谷を削らなくなる。この結果, 陸棚には堆積物はほとんど供給されなくなる。堆積場は浅海域に限られ, その沖側ではコンデンス・セクションが形成される。この堆積体の下位は海進面, 上位は最大海氾濫面 (Maximum Flooding Surface) で区切られる。最大海氾濫面は最も海域が広がったときに形成される面である。

海水準の上昇速度が穏やかになると, 高海水準期堆積体が形成される。高海水準期堆積体はユースタシーが上昇する時の変曲点を過ぎたとき, すなわち相対的の海水準の上昇速度が遅くなりだすときにでき始める (第6図d)。堆積システムが前進を始めるため, この堆積体はいわゆる海退相を示す。堆積システムがこれ以前の堆積体の上を沖に向かって前進していく。このため, この堆積体と下位の堆積体との境界はダウンラップ面となる。この堆積体の形成段階の後半を特徴づけるのは河川堆積物である。この堆積体の上部は次の海水準の低下によってできるタイプ1, あるいはタイプ2のシーケンス境界によ

て区切られる。

この後の海水準の低下, 上昇に伴ってこれらの堆積体の形成が繰り返される。しかしこの高海水準期堆積体形成後の海水準の低下が小さい場合には陸棚外縁堆積体が形成される (第6図e)。この堆積体の基底はタイプ2のシーケンス境界になる (第7図)。この堆積体は前進というよりは累積的な地層の重なりをしている。それは相対的の海水準の上昇速度がこれ以前の高海水準期堆積体の形成期よりも大きいためである。陸棚外縁堆積体の上位には海進期堆積体, またはコンデンス・セクションが重なる。

1つのシーケンスは普通, 3つの堆積体から構成される (第7図)。シーケンスを構成する堆積体はシーケンスのタイプで異なる。タイプ1のシーケンスでは下位から低海水準期堆積体, 海進期堆積体, 高海水準期堆積体, タイプ2のシーケンスでは陸棚外縁堆積体, 海進期堆積体, 高海水準期堆積体からなる。

パラシーケンス

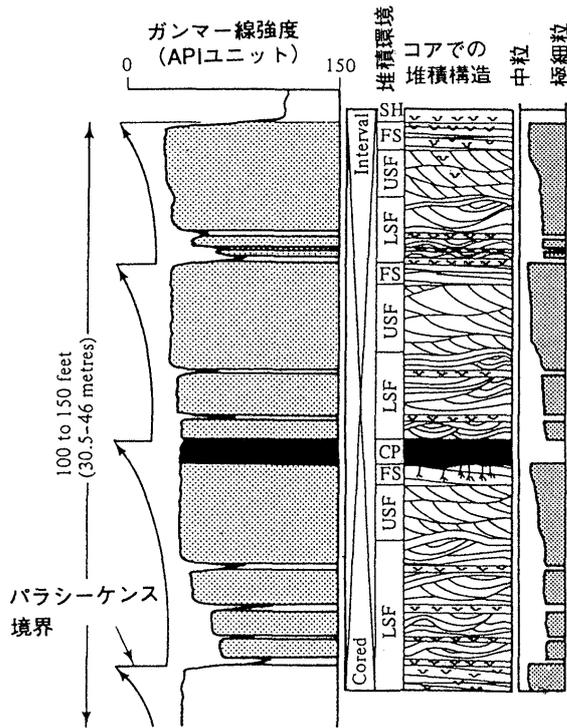
パラシーケンスはシーケンスおよび堆積体を構成するユニットである。パラシーケンスは“同一の成因で形成された, 整合的に重なる単層, または単層のセットで, その上下を海氾濫面またはその延長面で区切られる”と定義されている (Van Wagoner et al., 1988)。これは海岸平野, デルタ, 海浜, エスチュアリー, 陸棚環境の堆積物に見られる。一般には上方に粗粒化する前進性のユニットから構成される (第8図)。

海氾濫面 (Marine Flooding Surface) はパラシーケンスの境界面である。海氾濫面の上下の地層の堆積環境を比較すると, 上位の地層では急激に古水深が増加する証拠が見られる。水深が増加するときには, 小規模の海底侵食を伴うことがあり, 海氾濫面が小規模な侵食面で特徴づけられることもある (Van Wagoner et al., 1988)。ここでは陸上での侵食の証拠や堆積盆方向への堆積相の分布移動などが見られないことから, シーケンス境界とは区別される。この面には無堆積やハイエイトスの証拠が見られることもある。海氾濫面は3次元的にみるとその起伏は小さく, その比高は数cmから数10cm程度の小さなものがほとんどである。

海氾濫面はたいてい, 海岸平野や陸棚環境にその延長面が見られる。この延長面では, 水深の変化が地層に現われにくい。上下の堆積環境を比較しても, あまり大きな環境の変化は見られないことが多い。

パラシーケンスは第4～第5オーダーの海水準変動に伴ってできた地層に対して使われる (Van Wagoner et al., 1990)。これらのオーダーのサイクルの中にはパラシーケンスというよりは, シーケンスの特徴を備えたものも見られる。それをとくにパラシーケンスと区別して, 高周波シーケンス (High-frequency Sequence) と呼ぶ (Mitchum and Van Wagoner, 1991)。

パラシーケンスセットは似たような環境で形成された

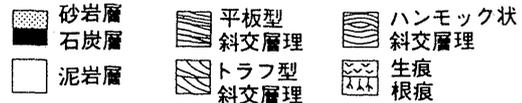


パラシーケンス内部の特徴

- ・砂岩層あるいは上方厚層化を示す端層セットからなる。
- ・砂岩/泥岩比が上方に増加する。
- ・上方粗粒化を示す。
- ・一般にラミナの傾は上方ほど急になる。
- ・パラシーケンス境界に向かって上方に生物擾乱が減少する。
- ・上方に浅海化を示す。

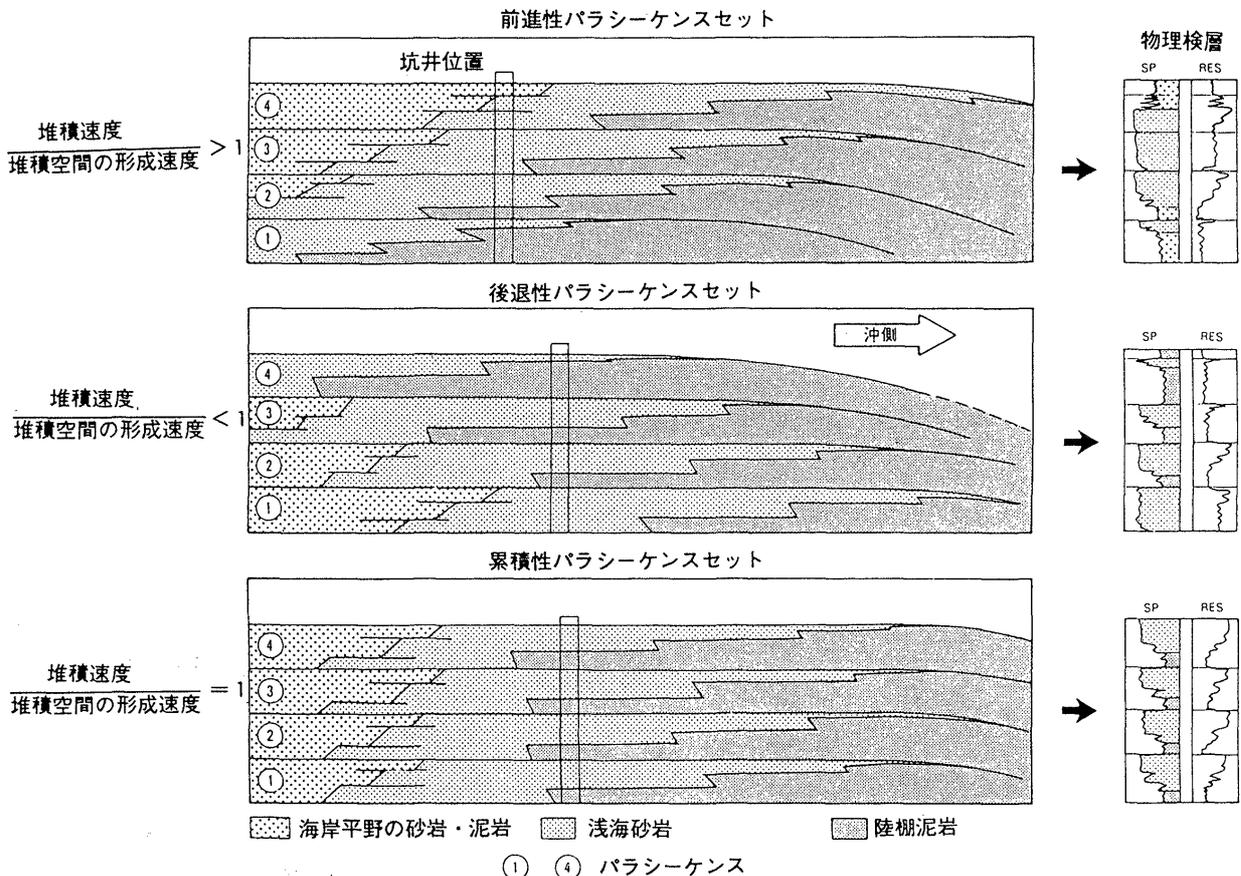
パラシーケンス境界の特徴

- ・砂岩層から泥岩層、あるいは石炭層から砂岩層という岩相の急変が見られる。
- ・層厚が急変する。
- ・極小規模な侵食が一部で認められる。
- ・海緑石、燐灰石、貝殻片が境界上の堆積物に含まれる。
- ・境界から上位で急に深い堆積環境に変わる。
- ・境界で生物擾乱の程度が変わる。



FS = 前浜 USF = 上部外浜 LSF = 下部外浜
CP = 海岸平野 SH = 陸棚

第8図. 外浜から海浜環境で形成されるパラシーケンスの模式柱状図, およびパラシーケンス内部, 境界面の特徴 (Van Wagoner et al., 1990).



第9図. パラシーケンスの累重パターンと堆積速度と堆積空間との関係 (Van Wagoner et al., 1988).

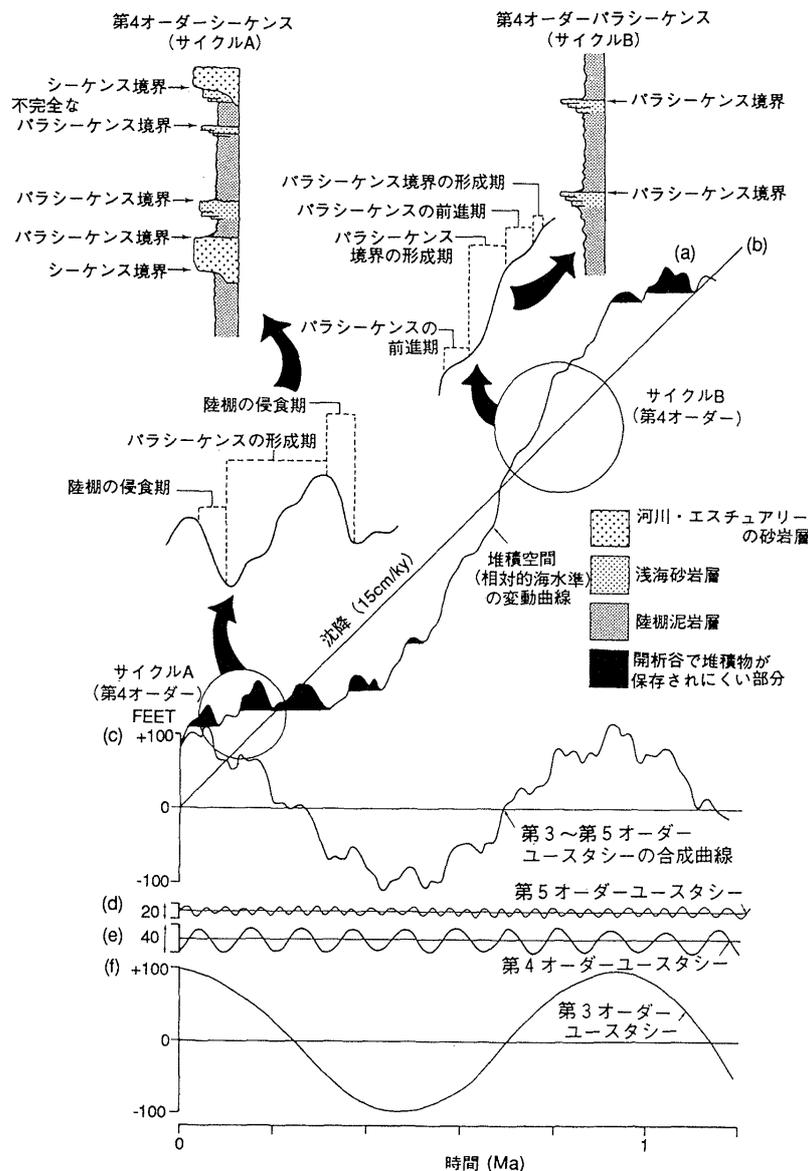
連続的に増加していくが、ごく短い間に堆積空間は取り去られてしまうことをこの図は表している。堆積空間が減少する時には、陸棚では侵食が起こり、堆積物はほとんど保存されない。シーケンス境界はこの堆積空間が減少したときに形成される。パラシーケンスは堆積空間の増減の変化速度を記録している。パラシーケンスのトップでは堆積空間の増加速度が最も遅くなる。一度堆積空間が増加すると、そこで海氾濫面が形成される(第10図)。

シーケンス層序学とユースタシー

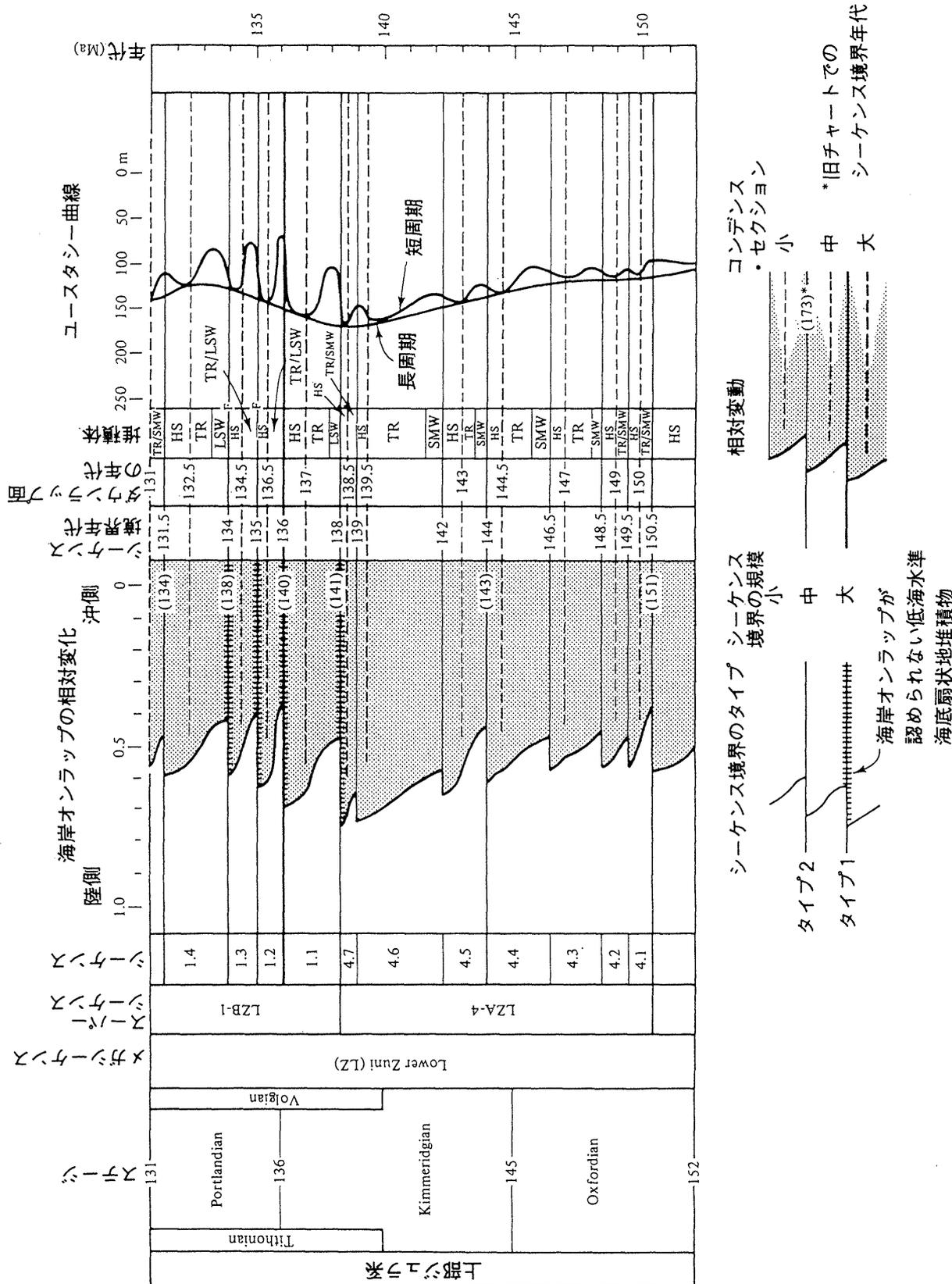
Vail 達のグループが研究を進めてきたように、露頭や

井戸データ、あるいは震探データをもとにして堆積物の重なりを解析することによって、大まかにユースタシーを復元することができる。海水準が低下するときは、シーケンス境界が形成される時期から知ることができる。海進面形成以降の海水準の上昇速度が最も速い時期は、コンデンス・セクションやダウンラップ面の存在から知ることができる。海水準の上昇量や下降量は海岸オンラップを調べることから見積ることができる。

高海水準期に河川堆積物の堆積が始まるとオンラップの位置は陸側に移動する。震探断面では河川堆積物と海岸やデルタの堆積物を区別することができないため、震



第10図. シーケンス, パラシーケンスと相対的の海水準変動, 堆積空間との関係. (a) は第3, 第4, 第5 オーダーのユースタシー ((d)-(f)) の合成曲線 (c) にテクトニックな沈降 (b) を重ね合わせたものである. この曲線から相対的の海水準の上昇 (堆積空間の増加) はほぼ連続的に起きていることがわかる. 曲線の傾きがゆるくなったり, 負の傾きを持つ時には, 形成される堆積空間が減少したり, 堆積空間が取り去られる. また, 地層の保存ポテンシャルが低いと思われるところは黒で塗りつぶして強調してある. シーケンス境界はこの期間に形成される. パラシーケンス境界は上昇速度が遅くなった時期の終わり頃に形成される. 次の海水準の上昇速度が速くなる時に, 海氾濫面が形成される (Van Wagoner et al., 1990).



第11図. エクソングループによって提唱されたグローバルサイクルチャート (Haq et al., 1987より一部抜粋)

探断面でのオンラップを純粋に海岸オンラップと定義することはできない。河川堆積物は海面よりも高いところに堆積するため、その堆積は相対的な海水準変動によって引き起こされる基準面の変化と直接関係している。かつての Vail 曲線では河川堆積物を考慮せず、震探断面上でオンラップと海岸オンラップが同等であると見なし、それをもとにユースタシーの復元を行なった。このため、急速な海水準の低下、ゆっくりとした海水準の上昇といった、鋸の歯形の変動が強調されてしまったわけである。

1987年になって中生代から新生代のグローバルサイクルチャートが公表された (Haq et al., 1987)。第11図はその抜粋である。これは論文の筆頭著者の名前をとって、Haq 曲線と呼ばれることが多い。この図から、短い周期のユースタシーはさらに長い周期の変動の上に重ねあわさっていることがわかる。これを提唱したエクソグループでは、これを使ってシーケンスは世界各地で追跡できるとしている。しかし、彼らはその基本としているデータベースを公開しておらず、それが正しいかどうか、今のところ判断することはできない。

この Haq のサイクルチャートは、「シーケンスの発達にはユースタシーが大きく影響する」という仮定のもとに世界で広く利用されている。今のところ、シーケンスの形成はユースタシーに大きく支配されていると考える研究者達と、テクトニックな影響を強く受けた相対的な海水準変動に支配されて形成されると考えている研究者達とがいて、論争が続けられている。地質学者のほとんどが長周期のユースタシーの変動は、新たに海嶺が成長することによって引き起こされる。つまり、海というバケツの体積の変化、陸上へ輸送される水の量の変化によっておこる。しかしこのプロセスが引き起こすのは千年におよそ 1 cm のオーダーで起こるような遅い変動である。Vail らが提唱している短い周期の変動は 1 年に 1 cm のオーダーでおこるような変動である (第 3 ~ 第 5 オーダー)。こうした速度の大きい変動は、陸上の氷床の消長や地中海のような大きな海盆での水の蒸発などによって起こると考えられている。しかし、こうした短周期の変動が、氷河がなかったといわれている中生代の中頃にも見られることから、その原因には問題が指摘される。

氷河性のユースタシーは地球の太陽から受け取るエネルギーの変動と大きな関わりがあり、それに影響を与える要素としては春分点歳差 (19000, 23000年)、地軸の傾き (41000年)、公転軌道の離心率 (100000年) の変動がある。もしこれらの要素が地層の形成に影響するならば、氷河がなかった時期にどのように地球軌道や回転の変動が地層の形成に影響したのか、ということが大きな問題となる。

多くの地質学者は相対的な海水準変動が大陸縁部や堆積盆での地層の形や堆積相の分布に影響を与えると考えている。それに対する反発も少なくはない。エクソグループによって提唱されたユースタシーが正しいことが証明された場合でも、否定された場合でも、石油探査

の立場からは震探層序解析がたいへん強力な武器であることに違いはない。地層の研究から知られている海水準変動が、氷河性のものなのか、テクトニック起源のものなのかを、はっきりと区別する方法は現在のところ、確立されていない。しかし、その原因がどちらにせよ、シーケンス層序学の手法は露頭や地下の地層区分の方法として、今後も使われることであろう。

ま と め

シーケンス層序学は、成因論的地層観ともいえる新しい地層観を呈示し、層序学、堆積学、構造地質学、石油地質学などに強く影響を与えてきた。ここでは、既に教科書に取り入れられ、わかりやすい解説がなされている外国の教科書、解説論文をもとにシーケンス層序学の基本的な考え方を紹介した。シーケンス層序学に関しては、安藤 (1990)、伊藤 (1990)、保柳・西村 (1992)、増田 (1993)、荒戸 (1993, 1994)、保柳ほか (1994)、斎藤 (1994) などによってすでに日本語の紹介、解説論文が出されているので参照してほしい。また、堆積学研究会報36号「シーケンス層序学」(1992)、石油技術協会誌59巻1号「シーケンス層序学—その可能性を求めて」(1994) などの特集号にも紹介や具体的な研究例が示されているので参考にしてほしい。最後に、この紹介論文を書くことを勧めていただいた地質調査所の中村光一氏にお礼申し上げる。

文 献

- 安藤寿男, 1990, 堆積シーケンスとその境界の認定と意義. 地学雑. **99**, 247-262.
- 荒戸裕之, 1993, シーケンス層序学と石油の探鉱(その1:概観). 石油の開発と備蓄, **26**(6), 97-114.
- 荒戸裕之, 1994, シーケンス層序学と石油の探鉱(その2:解析手法). 石油の開発と備蓄, **27**(1), 86-104.
- Bally A.W., 1989, *Atlas of seismic stratigraphy*. Studies in Geol. Amer. Assoc. Petrol. Geol. no. 27, vols. 1,2,3.
- Campbell, C.V., 1967, Laminae, lamina set, bed and bed set. *Sedimentology*, **8**, 7-26.
- Haq, B.U., 1991, Sequence stratigraphy, sea-level change, and significance for the deep sea. In MacDonald, D.I.M, ed., *Sedimentation, tectonics and eustasy, sea-level changes at active margins*. Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment., no. 12, 3-39.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987, Chronology of fluctuating sea levels since Triassic. *Science*, **235**, 1156-1167.
- 保柳康一・西村瑞恵, 1992, シーケンス層序学—基本概念とその可能性—(その1) 基本概念. 地球科学, **46**, 169-176.
- 保柳康一・西村瑞恵・高野 修, 1994, シーケンス層序学—基本概念とその可能性—(その2) 堆積地質学への応用. 地球科学, **48**, 157-168.
- 伊藤 慎, 1990, 海水準変動と堆積相. 大原 隆・西田 孝編「地球環境の変容」, 朝倉書店, 62-73.
- Loutit, T.S., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1988, Condensed section: the key to age determination and correlation of continental margin sequences. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes—an integrated approach*. Spec. Publ. SEPM, no. 42, 183-213.
- 増田富士雄, 1993, シーケンス層序学: 我が国における陸域地質への適応例. 石技誌, **58**, 292-310.
- Mitchum, Jr., R.M. and Van Wagoner, J.C., 1991, High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic

- evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sediment. Geol.*, **70**, 131-160.
- Mitchum, Jr., R.M., Vail, P.R. and Thompson, III., S., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In Payton, C.E., ed., *Seismic stratigraphy—applications hydrocarbon exploration*. Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol., no. 27, 53-62.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tracts models. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes—an integrated approach*. Spec. Publ. SEPM, no. 42, 125-154.
- 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.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes—an integrated approach*. Spec. Publ. SEPM, no. 42, 109-124.
- 斎藤文紀, 1994, 東北日本太平洋側の陸棚におけるシーケンス—海進面, ラビーンメント面と海氾濫面—. 月刊地球号外, no.8, 80-85.
- Vail, P.R., Audemard, F., Boeman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Cruz, C., 1991, The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology—an overview. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag, 617-659.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, 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., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes—an integrated approach*. Spec. Publ. SEPM, no. 42, 39-45.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campian, K.M. and Rahmanian, V.D., 1990, *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and out crops*. Methods in Explor. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Ser. 7, 55p.
- Watts, T., 1992, The formation of sedimentary basins. In Brown, G.C., Hawkesworth, C.J. and Wilson, R.C.L., eds., *Understanding the earth, a new synthesis*. Cambridge Univ. Press, 301-324.
- Wilgus, C.K., Hasting, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., 1988, *Sea-level changes—an integrated approach*. Spec. Publ. SEPM, no. 42, 504p.
- Wilson, C., 1992, Sequence stratigraphy—an introduction. In Brown, G.C., Hawkesworth, C.J. and Wilson, R.C.L., eds., *Understanding the earth, a new synthesis*. Cambridge Univ. Press, 388-414.

(要 旨)

酒井哲弥・斎藤文紀・増田富士雄, 1995, シーケンス層序学入門. 地質学論集, no. 45, 1-14. (Sakai, T., Saito, Y. and Masuda, F., 1995, Sequence sdratigraphy: an introduction. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 45, 1-14.)

1980年代後半にエクソングループの手によってシーケンス層序学が確立された。ここではその概念について説明する。その中でも特に、シーケンス層序学で最も基本となるユニットであるシーケンスとそれを構成するユニットの特徴を説明し、ユースタシーが地層形成にどう影響するかについて議論する。