用語解説

Forced regression

伊藤 慎*

(Received March 11, 2005 ; accepted July 8, 2005)

Forced regression

Makoto Ito

Abstract : In this commentary article, architecture, component lithofacies, and bounding surface features of forced-regressive deposits are discussed in terms of a four-fold classification scheme of sequence stratigraphy in siliciclastic successions. Forced-regressive deposits are interpreted to represent a falling-stage systems tract, which develops mainly in a shallow marine environment, and to be equivalent chronostratigraphically to basin-floor-fan and slope-fan deposits in a deep-water environment. The standard sequence-stratigraphic model classifies shelf-margin deltas as a component of the lowstand wedge, which is interpreted to develop over the basin-floor-fan and slope-fan deposits. However, shelf-margin deltas, in general, consist of downstepping forced-regressive and overlying progradational and aggradational deposits, which can be assigned, respectively, to falling-stage and lowstand systems tracts of the four-fold classification scheme. Recognition of forced-regressive deposits depends on appropriate definition of datum for the correlation of stratigraphic successions and on detailed process-oriented lithofacies analysis that is crucial for the identification of depositional events responding to a relative sea-level fall. Thus, practical approaches of facies analysis and sequence-stratigraphy should constantly be upgraded for the better understand of formative processes, 3D geometry, distribution patterns, and heterogeneity of forced-regressive deposits.

Key words : forced regression, falling-stage systems tract, regressive surface of erosion, sequence stratigraphy

1. はじめに

地層にはさまざまな時間・空間スケールによって発生した海進・海退現象が記録されており、このような記録を適切に解釈し対比することが地層の形成過程とその要因を解明するために重要であると考えられてきた (例えば, Heckel, 1986 ; Ager, 1993)。シーケンス層序学においても、シーケンス境界をはじめとする基本的な地層境界面や堆積体 (systems tract) の識別には、海進・海退現象の適切な解釈が不可欠である (例えば, Posamentier *et al.*, 1988)。一般に、海進・海退現象と相対的海水準の上昇・低下とは必ずしも一対一に対応する現象ではないことが、Curry (1964) によって早くから指摘されている。

*千葉大学理学部地球科学科 Department of Earth Sciences, Chiba University

例えば、海退現象に注目すると、相対的海水準の低下にともなって堆積空間が減少していく場合、堆積速度の大小に関係なく海退が発生する。このように相対的海水準の低下に伴っていわば強制的に発生する海退は forced regression と呼ばれている (Posamentier *et al.*, 1992) (図1)。一方、相対的海水準の上昇期から最高期にかけて堆積空間が増加していく過程で、堆積空間の形成速度よりも堆積速度の方が大きい場合にも海退が発生する。このような堆積速度に依存して発生する海退は normal regression と呼ばれる (図1)。一般に、シーケンス層序学において高海水準期堆積体 (highstand systems tract) として認定されてきた堆積物は、相対的海水準の上昇期から最高期に発生した normal regression に伴って形成された地層である (図2)。これに対し、相対的海水準の低下に伴って発生する forced regression によって形成された地層のシーケンス層序学的な位置づけについては、従来のシー

図1 海退システムの堆積形態と岩相の垂直的变化 (伊藤, 1999 を改変)

①相対的海水準上昇期の海退。アグラデーションが特徴的に発達する。②相対的海水準最高期の海退。アグラデーションがなくなり、プログラデーションが卓越する。③相対的海水準低下期の海退。ダウンステップに伴うプログラデーションが発達し、海退期海成侵食面 (RSME) が形成される。日本地質学会 © 1999 転載許可済

ケンスモデルでは詳しく議論されていない。ところが、最近では、forced regression で形成された地層を高海水準期堆積体や低海水準期堆積体とは異なった堆積体として識別し、1つの堆積シーケンスを4つの堆積体の集合体として解釈する研究が増えてきている (例えば、Hunt and Tucker, 1992 ; Plint and Nummedal, 2000) (図2)。ここでは、このような forced regression で形成される地層に注目し、その特徴とシーケンス層序学的な位置づけについて考察する。

2. Forced regression 堆積物の認定

高海水準期に発生する normal regression では、沖合で形成される泥質堆積物の上位に沿岸域で形成された砂質堆積物が漸移的に重なっていくため、下部から上部へ徐々に浅海化を示す地層が形成される (図1)。一般に、normal regression ではアグラデーションを伴うことが多いため、このような上方浅海化を示す地層の層厚は、堆積後の圧密の効果を無視すれば、古水深よりも厚くなる場合が多い。これに対し、相対的海水準の低下は、静穏時波浪作用限界水深の大きさがほぼ一定と仮定した場合、波浪作用の影響を受ける海底の位置を沖合へ移動させることになる (Plint, 1988) (図1)。この結果、沖合の陸棚上で形成された泥質堆積物の上位に明瞭な侵食面、

すなわち海退期海成侵食面 (regressive surface of marine erosion: RSME ; Nummedal *et al.*, 1993) によって外浜以浅の沿岸域で形成された砂質堆積物が直接重なることになる (Plint, 1988 ; Walker and Plint, 1992) (図1)。また、最近では、相対的海水準の低下に伴って、潮流による海退期海成侵食面の形成が行われ、その上位に潮汐作用の影響を強く受けて形成された三角洲堆積物が発達する場合のあることが明らかとなってきた (Bhattacharya and Willis, 2001 ; Willis and Gabel, 2001)。このように、forced regression に伴って形成された砂質堆積物は堆積空間の減少に伴って形成されるため、一般にその層厚は normal regression 堆積物に比べ薄いことが多い。相対的海水準の低下が一様ではなく、より短い周期の相対的海水準の上昇と低下を複数伴いながら相対的海水準が全体として低下していった場合、より短い周期の相対的海水準の低下に対応して複数の forced regression 堆積物が順次沖合に向かって形成されていくことになる (図3)。その結果、個々の forced regression 堆積物の形成に対応して異なった時期に形成される複数の海退期海成侵食面が発達することになる (図3)。

Normal regression は相対的海水準の上昇期から最高期にかけて発生するため、この時期に形成される堆積物、すなわち高海水準期堆積体は下部のシーケンス

図2 シーケンスモデル (Exxon モデル) の構成 (伊藤, 2003 を改変)

③堆積シーケンスを構成する3つの堆積体の分布と重なり様式の特徴。④堆積シーケンスを構成する堆積体の間に認められる時間間隙の空間的変化。⑤相対的海水準の変動に基づく堆積体の形成時期。(1)はExxonモデルで示されたシーケンス境界と3つの堆積体の形成時期。(2)は低下期堆積体 (FSST) を識別し、1つの堆積シーケンスを4つの堆積体の集合として捉えた場合の構成堆積体の形成時期。(2)のように、1つの堆積シーケンスが4つの堆積体で構成される場合、シーケンス境界の形成時期については2つの解釈が提案されている。最近では、低下期堆積体と狭義の低海水準期堆積体の境界、すなわち相対的海水準が最も低下した時期に形成される侵食面とこれに対比される整合面にシーケンス境界を設定するという解釈が広く採用されるようになってきている。資源地質学会 © 2003 転載許可済

境界に対してオンラップの関係で発達することになる (Van Wagoner *et al.*, 1988)。これに対し、forced regressionは相対的海水準の低下に伴って発生するため、forced regression 堆積物では上位の堆積物ほどオフラップならびにダウンステップの関係で沖合へ向かって発達していくことになる (図1, 3)。したがって、forced regression 堆積物は層序断面図において、沖合に向かって上面高度を低下させる堆積形態を特徴的に示すことになる (図3)。

3. Exxon モデルにおける forced regression 堆積物の位置づけ

これまでのシーケンス層序学において広く適用されてきたモデル (Vail, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1988) は Exxon モデルあるいは Vail モデルと呼ばれている (図2)。このモデルはメキシコ湾地域をはじめとする受動的大陸縁辺域で特徴的な、陸棚から斜面へと明瞭な海底勾配の変化を伴う堆積盆地で形成された地層の研究に基づいて組み立てられたものである。このモデルの特

徴は、相対的海水準の低下に伴って陸棚が露出している、露出した陸棚から陸棚外縁では開析谷や海底谷が形成され、これに伴って陸源碎屑粒子の多くが陸棚外縁以深へ供給されるようになっていき、その結果、深海底では basin-floor fan や slope fan などの堆積システムが発達すると解釈されていることである。したがって、このモデルでは、相対的海水準の低下に伴った陸棚における堆積システムの形成プロセスに関しては詳しく議論されていない。これは、相対的海水準が陸棚外縁付近まで低下した場合、陸棚上に浅海成堆積物を発達させるために必要な堆積空間が存在しないことや、この時期は主に河川による侵食作用が広範囲に働く可能性が考えられることなどが考慮されているものと解釈される。一方、Vail (1987) ではこのような Exxon モデルとともに、ロッキー山脈東縁に沿って発達した Western Interior などの前陸堆積盆地を特徴づける ramp margin と呼ばれる、陸棚から斜面への明瞭な海底勾配の変化が存在しない堆積盆地で形成される堆積シーケンスのモデルが同時に提案されて

図3 相対的海水準の低下期に形成される浅海堆積システムの断面形態と地層境界面の特徴 (Plint and Nummedal, 2000 を改変)

ここでは、相対的海水準が大きく低下していく過程で、より短い周期の相対的海水準の上昇と低下が発生した場合が想定されている。図中の1～15は時間のユニットを示す。Time 4で相対的海水準の低下が開始され、最初の高退期海成侵食面 (RSME1) が形成される。さらに、Time 9～Time 12にかけての相対的海水準の低下で2番目の高退期海成侵食面 (RSME2) が形成される。相対的海水準が最も低下した時期 (Time 12) には、広く河川による侵食作用が働き、この時期に形成される侵食面とこれに対応する整合面がシーケンス境界 (SB) として設定される場合がある。さらに、Time 13までの相対的海水準の上昇初期にはアグラデーションとプログラデーションで特徴づけられる堆積物が形成され、狭義の低海水準期堆積体あるいはExxonモデルにおけるlowstand wedgeが発達する。下の模式的な柱状図は、層序断面図のA～Dの位置における地層の重なり様式と地層境界面の特徴を模式的にまとめたもの。図中の番号 (4, 10, 13) は上の図の時間のユニットに対応する。The Geological Society © 2001 転載許可済

いる。Ramp margin では、相対的海水準がどこまで低下しようとも、陸棚上に浅海成堆積物を発達させるために必要な程度の大きさの堆積空間が確保されるため、forced regression 堆積物が発達しやすいと考えられる。したがって、Vail (1987) で示された ramp margin のモデルには、相対的海水準の低下に伴って発達する forced regression 堆積物の存在が明記されており、このような堆積物は lower lowstand prograding wedge (Exxon モデルの lowstand wedge に対応する) として定義されている。

受動的縁辺域などの堆積盆地においても、相対的海水準が陸棚外縁付近まで常に低下することはない。したがって、相対的海水準の低下量が小さい場合、縮小した陸棚上に浅海成堆積物を発達させるために必要な堆積空間が確保され、forced regression 堆積物の形成と保存が可能となる。1990年代に入り、さまざまなタイプの堆積盆地において forced regression 堆積物の発達

が広く認められるようになると、それまで陸棚外縁三角州 (shelf-margin delta) 堆積物として認定されていた堆積物の多くが、氷河性海水準の低下に伴って形成された forced regression 堆積物として注目されるようになってきた (Posamentier *et al.*, 1992; Genson and Tesson, 1996)。一方、Exxon モデルでは、陸棚外縁三角州堆積物は lowstand wedge の主要構成要素として捉えられてきており、その形成は主に相対的海水準上昇初期に行われると解釈されている (Posamentier *et al.*, 1988)。したがって、陸棚外縁三角州堆積物を forced regression 堆積物と解釈するとともに、一方でこれを lowstand wedge として位置づけた場合 (Tesson *et al.*, 1990; Posamentier *et al.*, 1992)、この2つの解釈には大きな矛盾が生じることになる。本来、lowstand wedge は陸棚外縁三角州堆積物を念頭に入れて組み立てられた堆積システムではあるが、一方で、lowstand wedge は開析谷や海底谷頭部に限定されて発達する三角州堆積物としてモデル化されている (Posamentier *et al.*, 1991)。しかし、これまでのところ、

開析谷や海底谷頭部に沿って発達した陸棚外縁三角州堆積物は、メキシコ湾地域に限ってみた場合、ミシシッピー海底谷上流部でのみ確認されており (Goodwin and Prior, 1988), この他のメキシコ湾地域で認められる陸棚外縁三角州堆積物 (例えば, Suter and Berryhill, 1985) の大部分は、一般に開析谷や海底谷と結びついておらず、陸側では高海水準期に発達した三角州堆積物へ連続 (attached) している (Sydow and Roberts, 1994; Morton and Suter, 1996) (図 4)。しかし、地中海沿岸のローヌ川河口から沖合の陸棚外縁部においては、高海水準期に形成された三角州堆積物から完全に分離 (detached) した陸棚外縁三角州堆積物の存在が確認されている (Tesson *et al.*, 1990)。

4. 堆積体 (systems tract) としての位置づけ

1つの堆積シーケンスを構成堆積体に細分した場合、特に低海水準期堆積体の細分については、これまでにさまざまな区分方法及名称が提案されてきている (図 5)。Exxon モデルでは低海水準期堆積体は下部から basin-floor fan, slope fan, lowstand wedge の 3つの堆積システムに細分されている (図 2)。このうち basin-floor fan と slope fan の一部は相対的海水準の低下期に、slope fan の一部と lowstand wedge は相対的海水準の上昇初期に形成される堆積システムとして位置づけられている (Van Wagoner *et al.* 1988)。したがって、forced regression 堆積物の形成は、basin-floor fan や一部の slope fan の形成時期に対応して行われることになる (Hunt and Tucker, 1992)。一般に、forced regression 堆積物の特徴とその形成プロセスに関する議論では、陸棚以浅で形成された三角州堆積物や海浜堆積物が対象となることが多いため、forced regression に対応して発達する basin-floor fan や slope fan を構成するタービダイトをはじめとする深海底堆積物の詳しい特徴については、これまでほとんど議論されていない (伊藤ほか, 2004)。

Van Wagoner *et al.* (1990) は Exxon モデルを基本的に踏襲しながらも、Western Interior で形成された地層を解析する過程で、低海水準期初期の forced regression に伴って形成された外浜堆積物の存在を認め、このような外浜堆積物を early lowstand systems tract として識別した。その後、このような堆積物と同様に forced regression に伴って形成された堆積物は、forced regressive systems tract (FRST) (Hunt and Tucker, 1995) あるいは falling stage systems tract (FSST) (Plint and Nummedal, 2000) として定義され、1つの堆積シーケンスを構成する独立した堆積体として認識されるようになっていく (図 2)。このように FRST や FSST を 1つの堆積シーケンスを構

成する堆積体として独立させた場合、従来 Exxon モデルで lowstand wedge とされてきた堆積物のみが低海水準期堆積体として再定義されることになる (図 2)。したがって、この狭義の低海水準期堆積体は相対的海水準の上昇初期に形成されるため、上部ほどアグラデーションの傾向を顕著に示すプログラデーションを特徴とする地層となる (図 4)。一方、forced regression 堆積物の存在を明瞭に認めてはいるものの、これらの堆積物を FRST や FSST などの独立した堆積体として定義せず、高海水準期堆積体に連続して発達する堆積物であることから、late highstand systems tract として区分し、従来の Exxon モデルで使用された堆積体の名称がそのまま使用されることもある (Willis and Gable, 2001) (図 4)。このような場合、従来の高海水準期堆積体は early highstand systems tract として区別されている。

5. シーケンス境界の位置

Exxon モデルでは、相対的海水準の低下に伴ってシーケンス境界が形成され、その上位に低海水準期堆積体が発達すると考えられている。したがって、この解釈に従えば、forced regression 堆積物の基底、すなわち海退期海成侵食面とこれに対比される整合面にシーケンス境界を設定することができる (Posamentier *et al.*, 1992)。相対的海水準の低下に複数のより短い周期で発生した相対的海水準の上昇と低下が複合した場合、短い周期の相対的海水準の低下に対応して複数の海退期海成侵食面が異なった時期に形成されることになる (図 3)。このため、Posamentier *et al.* (1992) は、最初に形成される海退期海成侵食面とこれに対比される沖合で形成される整合面をシーケンス境界として定義すべきであると主張している。このような彼らの解釈は、Exxon モデルで定義されたシーケンス境界の基本的概念を踏襲するものである。しかし、コア観察や露頭観察あるいは検層データなどに基づいて整合的なシーケンス境界を認定することは、たいへん難しいものと考えられる。一方、Van Wagoner *et al.* (1990) は、Exxon モデルの枠組みを踏襲しながらも、forced regression で形成された外浜堆積物 (彼らの early lowstand systems tract) の上面が広く河川による侵食作用を受けていることを認め、この侵食面をシーケンス境界として定義している (図 5)。しかし、このようにシーケンス境界が定義された場合、彼らが踏襲した Exxon モデルによるシーケンス境界の定義、すなわちシーケンス境界は低海水準期堆積体の基底部に発達するという解釈と矛盾することになる。その後、Van Wagoner *et al.* (1990) によって定義されたシーケンス境界の概念が発展させられた。すなわち、forced regression 堆積物の上面に認

図4 メキシコ湾地域で認められる陸棚外縁三角州堆積物

④地震探査記録に基づいて作成された陸棚外縁三角州堆積物の層序断面図 (Sydow and Roberts, 1994 に加筆)。Sydow and Roberts (1994) は、海退期海成侵食面 (RSME) より上位に発達する堆積物を、forced regression 堆積物と解釈している。しかし、彼らは Exxon モデルの用語をそのまま適用して、forced regression 堆積物を高海水準期堆積体 (HST) として扱っている。その結果、forced regression 堆積物の上位に発達する河川作用によって形成された侵食面にシーケンス境界 (SB1) が設定されている。したがって、SB1 の上位に発達するアグラデーションとプログラデーションの特徴を示す堆積物は、狭義の低海水準期堆積体 (LST) となる。APPG © 1994 転載許可済

⑤高海水準期から相対的海水準低下期に至る過程で形成される三角州堆積物のモデル (Morton and Suter, 1996 に一部加筆)。HST = 高海水準期堆積体、FSST = 低下期堆積体 (falling-stage systems tract)。APPG © 1996 転載許可済

められる明瞭な侵食面は、相対的海水準が最も低下した時期に発達するため、時間面としての特徴を示すと考えられるようになった。したがって、この侵食面とこれに対比されるより沖合で形成される整合面をシーケンス境界として定義すべきであるという解釈が提案されている (Hunt and Tucker, 1992 ; Plint and Nummedal, 2000) (図2, 5)。このような forced regression 堆積物の上面に認められる侵食面は、海進期に波浪や潮汐による侵食作用を強く受けてラビンメント面に置き換えられることが

多い (Plint and Nummedal, 2000 ; Posamentier and Morris, 2000)。したがって、この侵食面は広域的に最も認定しやすい地層境界面と考えられている。一方、海進期の相対的海水準の上昇においてもより短い周期で相対的海水準が上昇と低下あるいは停滞を伴う場合、ラビンメント面も異なった時期に複数形成されることになる。したがって、異なった時期に形成された複数のラビンメント面を対比することによって、同時間面を設定することはできない。さらに、forced regression に伴って陸側ほど

図5 これまでに提案されている1つの堆積シーケンスを構成する堆積体の区分方法と名称

最近では、Hunt and Tucker (1992, 1995) に従った区分方法が採用される場合が多い（例えば、Nummedal *et al.*, 1993; Plint and Nummedal, 2000 など）。ただし、構成堆積体の名称についてはまだ統一されてはいない。

河川による著しい侵食作用を受ける。その結果、forced regression 堆積物の上面に発達する侵食面によって示される時間間隙の大きさは、陸側ほど大きく、この侵食面をシーケンス境界とした場合、シーケンス境界の時間面としての精度が著しく低下するという批判が出されている（Posamentier and Morris, 2000）。このように、現時点では forced regression 堆積物にともなうシーケンス境界の設定には大きく2とおりの解釈が提案されているが、いずれの解釈にも一長一短の特徴が認められる。

6. 側方変化

Forced regression 堆積物の堆積形態に注目すると、高海水準期堆積体と接して、その沖合側に複数のユニットが連続して発達している場合（attached）（図3、図4のような場合）と、高海水準期堆積体から分離し、パイプゾーンを介して沖合に1つないしは複数のユニットが孤立して発達している場合（detached）が認められている（Posamentier and Morris, 2000）。このような堆積形態の違いは、(1)相対的海水準の低下速度、(2)堆積物の供給速度、(3)河口ならびに沿岸域における河川作用や波浪・潮汐作用の強さ、(4)海底勾配、などに支配されると解釈されている（Posamentier and Morris, 2000）。例えば、同時期に同一の堆積盆地で形成された forced regression 堆積物を比較した場合、堆積物の供給速度と海底勾配の大きい地域では attached した堆積形態を示すのに対し、堆積物の供給速度と海底勾配の小さい地域では detached した堆積形態を示すことが知られている（McMurray and Gawthorpe, 2000）。さらに、海底勾配のみの違いを考慮した場合、海底勾配の小さい地域では大きい地域

に比べ、同じ相対的海水準の低下量に対して沖合に向かってより長距離にわたって forced regression が発生し、detached した堆積形態を取りやすくなると考えられている（Posamentier and Morris, 2000）。

一方、堆積盆地の沈降速度が海岸線に沿って空間的に変化している場合、ユースタシーの低下速度に比べ沈降速度が遅い地域では相対的海水準が低下し、明瞭な海退期海成侵食面を伴った downstep の堆積形態を特徴とする forced regression 堆積物が発達する。これに対し、ユースタシーの低下速度に比べ沈降速度が速い地域では、相対的海水準の低下が発生しないため、海退期海成侵食面は形成されず、normal regression 堆積物と同様にアグラデーションとプログラデーションを特徴とする堆積物が発達することになる（Hardy and Gawthorpe, 1998; Ito *et al.*, 2002）（図6）。したがって、沈降速度の空間的変化が著しい堆積盆地では、Posamentier *et al.* (1992) が主張しているように、forced regression 堆積物の基底にシーケンス境界が設定された場合、明瞭な侵食性のシーケンス境界の発達で特徴づけられる Type 1 の堆積シーケンスと、整合的なシーケンス境界を特徴とする Type 2 の堆積シーケンスが異なった場所で同時期に形成されることになる（Posamentier and Allen, 1999; Ito *et al.*, 2002）（図6）。このように沈降速度の空間的な変化が考慮された場合、Exxon モデルで主張されているように、Type 1 と Type 2 のシーケンス境界がユースタシーの変動パターンを反映して異なった時期に形成されるという概念は否定されることになる。

図6 沈降速度の空間的変化に伴う堆積シーケンスの形態と地層境界面の空間的変化 (Ito *et al.*, 2002 を改変)

4つの模式的な柱状図によって、異なった地点(各柱状図の上に示された記号に対応した地点)で形成される堆積物の特徴と地層境界面ならびに堆積体の側方変化が示されている。図2③の(2)と同様、シーケンス境界はSBまたはSB?のいずれかに設定される。

7. 石油・天然ガス探鉱における意義

Forced regression 堆積物として初めて具体的に認定された堆積物は、波浪作用の影響を強く受けた外浜以浅の沿岸域で形成された堆積物であったため (Plint, 1988), 一般に forced regression 堆積物は淘汰の良い砂質堆積物として捉えられてきた。さらに、これまでは相対的海水準の上昇に伴って、潮汐作用の影響が沿岸域でより強く作用するようになると一般的に考えられていたため (Van Wagoner *et al.*, 1990), forced regression 堆積物の上位に発達する狭義の低海水準期堆積体(あるいは lowstand wedge)は、forced regression 堆積物に比べ、潮汐作用の影響をより強く受けた堆積物として識別されると解釈されている (Mellere and Steel, 1995)。これに対し、最近では、forced regression 堆積物の中にも潮汐作用の影響を強く受けて形成されたと解釈される三角

州堆積物が認められるようになってきた (Bhattacharya and Willis, 2001; Willis and Gabel, 2001)。すなわち、従来考えられていたように、潮汐作用が相対的海水準の上昇に伴ってのみ強く作用するのではなく、潮浪の波長や水深と堆積環境の空間的広がりとの組み合わせに対応して (Allen, 1997), forced regression 堆積物が形成されていく時期においても、潮汐作用が強く働く場合のあることが明らかとなってきている (Willis and Gabel, 2001)。一般に、波浪作用の影響を強く受けて形成された forced regression 堆積物は淘汰が良く比較的均質であるため、良質の貯留岩を形成する可能性が高い。これに対し、潮汐作用の影響を強く受けて形成された forced regression 堆積物の場合、内部にダブルマッドドレープが複雑に発達するため、ダブルマッドドレープによって貯留岩内部が複数のコンパートメントに区切られ、その結果、全体として強い不均質性を示すようになる。

Western Interior に発達する貯留岩のなかには、当時の海岸線から 150 km 以上沖合に相当する地域で形成されたと考えられる、細長くて孤立した砂礫質堆積物が知られている。このような砂礫質堆積物は、陸棚で形成された泥質堆積物に挟在するため、良質な貯留岩となっている (Tilman and Martinsen, 1984)。当初、このような砂礫質堆積物は陸棚で形成されたサンドリッジ堆積物と解釈されていた (Tilman and Martinsen, 1984) (図 7 ④)。しかし、当時の海岸線から 150 km 以上離れた陸棚上へ粗粒な堆積物を供給するためのプロセスを合理的に説明することが困難であった。これに対し、forced regression の概念が普及するにつれて、孤立した砂礫質堆積物は forced regression に伴って形成された detached した海浜堆積物 (図 7 ⑤) あるいは三角州堆積物 (図 7 ⑥) であるという解釈が提案されるようになってきた (Posamentier *et al.*, 1992; Walker and Plint, 1992; Bhattacharya and Willis, 2001)。一方、このような孤立した砂礫質堆積物の一部は開析谷を埋積したエスチュアリー堆積物であるとの解釈も提案されている (Snedden and Bergman, 1999) (図 7 ④)。

一般に、貯留岩の三次元的な不均質性を評価するためには、地層の初生的な傾きとこれに伴う側方への岩相変化や挟在する浸透性の低い泥質堆積物の分布特性を的確に把握することが重要である (Bhattacharya and Willis, 2001)。Western Interior で認められる細長くて孤立した砂礫質堆積物の成因に関して、上記のように 4 つの解

釈がこれまでに提案されている (Snedden and Bergman, 1999; Bhattacharya and Willis, 2001) (図 7)。このような異なった解釈のいずれかを採用することにより、同じ砂礫質堆積物に対して異なった不均質性の評価が行われることになる。例えば、サンドリッジ堆積物の場合 (図 7 ④)、当時の海岸線に対してほぼ並行あるいはいくぶん斜交した関係で海進期の陸棚に発達する。砂礫質堆積物の内部には陸側ならびに沖合側に傾いた初生的な層理が形成され、特に潮流の影響を強く受けて形成された場合、内部には浸透性の悪い泥質堆積物が不規則に発達することになる。さらに一方向流の流速が大きくなる上流側の斜面では、空隙率の大きい礫質堆積物が発達する。これに対し、forced regression に伴って形成される海浜堆積物は、波浪作用の影響を強く受けるため、一般に淘汰が良く浸透性の高い砂礫質堆積物で構成される (図 7 ⑤)。しかし、全体として緩く沖合に傾いた層理が内部に発達するため、この層理に沿って沖合側ほど泥質となり、これに伴って浸透性が低下していく。また、海浜堆積物の場合、沿岸流の影響と河口からの距離の違いによって、海岸線に沿った方向においても構成堆積物の粒径や淘汰度が複雑に変化し、これに伴って浸透性に空間的な変化が生じる。一方、forced regression に伴って形成される三角州堆積物の場合 (図 7 ⑥)、砂礫質堆積物の延びの方向や初生的な層理の傾斜方向は当時の海岸線にほぼ直交することになる。三角州堆積物の形成は河川の影響を強く受けるため、サンドリッジ堆積物や海浜堆積物に比べて、

図 7 Western Interior で認められている当時の海岸線から遠く離れた地域に発達する細長くて孤立した砂礫質堆積物の成因に関する 4 つの解釈

Snedden and Bergman (1999) ならびに Bhattacharya and Willis (2001) などに基いて作成。

図8 基準面の取り方によって変化する堆積体の形態

図7に示された砂礫質堆積物 (a~d) について、基準面の対比方法が異なった場合、復元される堆積形態の特徴が大きく異なり、砂礫質堆積物の解釈に影響を及ぼす。

含まれる泥質堆積物の割合が非常に高くなる。また、三角州堆積物の形成が潮汐作用の影響を強く受けた場合、内部に多数のダブルマッドドレープが挟在するため、顕著な不均質性が発達する。さらに、狭義の低海水準期から海進期にかけて開析谷を埋積していくエスチュアリー堆積物では、サンドバー堆積物とその周辺に発達する泥底堆積物が不規則に重なり合うため、著しい不均質性が発達することになる (図7④)。

このように、細長くて孤立した砂礫質堆積物の成因をどのように解釈するかにより、貯留岩性状の予測やモデリングに大きな違いが生じることになる。では、いったいなぜこのような異なった解釈が行われて来たのであろうか。このような混乱を引き起こした大きな原因は、当初砂礫質堆積物の形態的特徴に注目が集中したことや、異なった datum の選定によるコアや検層データの対比が行われ、異なった堆積形態や層序断面図の復元が行われたことなどがあげられる (Snedden and Bergman, 1999) (図8)。しかし、もう1つ見逃せない重要な原因は、詳しい堆積相の解釈が適切に行われていなかったことにある。我が国では、堆積相やこれと関係の深いシーケンス層序の研究が既に完成され、あるいは時代遅れとなってしまったかのごとき錯覚が広がっているように思われる。しかし、限られたデータに基づいて貯留岩の形成過程や性状を適切に判断するためには、水理学的条件を十分に考慮した堆積相の詳細かつ適切な解析が不可欠といえよう。このような堆積相の解析なくしては、堆積相解析を基礎とするシーケンス層序においても、適切な解析結果を得ることは不可能である。したがって、forced regression 堆積物をはじめ、さまざまなタイプの砂質あるいは砂礫質堆積物を対象として、貯留岩性状を適切に

把握するためには、堆積プロセスを考慮した定量的でかつ詳細な堆積相解析の発展が今後不可欠になるものと考えられる。

謝 辞

徳橋秀一氏、井上正澄氏、ならびに田中哲夫氏には forced regression 堆積物の特徴をまとめる機会を与えていただきました。2名の査読者からいただいた多数の建設的なご意見は、本論の改善に大いに役立ちました。使用しました図の転載については、日本地質学会、資源地質学会、The Geological Society, American Association of Petroleum Geologists, A. Guy Plint 氏より許可をいただきました。この用語解説をまとめるにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金 (15340166) の一部を使用いたしました。これらの方々には心より感謝申し上げます。

引 用 文 献

- Ager, D.V., 1993 : *The Nature of The Stratigraphical Record* (3rd. Edition), Chichester, Wiley, 151 p.
- Allen, P.A., 1997 : *Earth Surface Processes*. Oxford, Blackwell, 404 p.
- Bhattacharya, J.P. and Willis, B.J., 2001 : Lowstand deltas in the Frontier Formation, Powder River basin, Wyoming: Implications for sequence stratigraphic models. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 85, 261-294.
- Curry, J.R., 1964 : Transgressions and regressions. In Miller, R.L., ed. : *Papers in Marine Geology*. New York, Macmillan, 175-203.
- Genson, B. and Tesson, M., 1996 : Sequence stratigraphy, seismic profiles, and cores of Pleistocene deposits on the

- Rone continental shelf. *Sediment. Geol.*, **105**, 183–190.
- Goodwin, R. H. and Prior, D.B., 1988 : Geometry and depositional sequences of the Mississippi Canyon, Gulf of Mexico. *Jour. Sediment. Petrol.*, **59**, 318–329.
- Hardy, S. and Gawthorpe, R.L., 1998 : Effects of variations in fault slip rate on sequence stratigraphy in fan deltas: Insights from numerical modeling. *Geology*, **92**, 911–914.
- Heckel, P.H., 1986 : Sea-level curve for Pennsylvanian eustatic marine transgressive-regressive depositional cycles along mid-continent outcrop belt, North America. *Geology*, **14**, 330–334.
- Hunt, D. and Tucker, M.E., 1992 : Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base level fall. *Sediment. Geol.*, **81**, 1–9.
- Hunt, D. and Tucker, M.E., 1995 : Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall-reply. *Sediment. Geol.*, **95**, 147–160.
- 伊藤 慎, 1999 : シーケンス層序学の基本的枠組み. 地質学雑誌, **105**, 508–520.
- Ito, M., Saito, T. and Someya, H., 2002 : Tectonic control of facies architecture in falling-stage deposits in a forearc basin: Upper Miocene Senhata Formation, Boso Peninsula, Japan. *Jour. Sediment. Res.*, **72**, 491–499.
- 伊藤 慎, 2003 : 石油・天然ガス鉱床の発達と海水準変動. 資源環境地質学—地球史と環境汚染を読む. 資源地質学会, 235–238.
- 伊藤 慎・齋藤高浩・中野孝教・市川暢子・佐伯貴央・久保雄大・高野壮太郎・中村 譲, 2004 : 上総層群の堆積作用と堆積シーケンス. In 伊藤 慎・小竹信宏 (編集) : 日本地質学会第 111 年学術大会見学旅行案内書, 日本地質学会, 109–131.
- McMurray, L.S. and Gawthorpe, R.L., 2000 : Along-strike variability of forced regressive deposits : late Quaternary, northern Peloponneso, Greece. In Hunt, D. and Gawthorpe, R.L., eds. : *Sedimentary Response to Forced Regressions*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. No. 172, 363–377.
- Mellere, D. and Steel, R., 1995 : Variability of lowstand wedges and their distinction from forced-regressive wedges in the Mesaverde Group, southeast Wyoming. *Geology*, **23**, 803–806.
- Morton, R.A. and Suter, J., 1996. Sequence stratigraphy and composition of Late Quaternary shelf-margin deltas, northern Gulf of Mexico. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **80**, 505–530.
- Nummedal, D., Riley, G.W. and Templet, P.L., 1993 : High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies. In Posamentier, H.W., Summerhayes, C.P., Haq, B.U. and Allen, G.P., eds. : *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment. No. 18, 55–68.
- Plint, A.G., 1988 : Sharp-based shoreface sequences and “offshore bars” in the Cardium Formation of Alberta: Their relationship to relative change in sea level. 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*. SEPM Spec. Publ. No. 43, 357–370.
- Plint, A.G. and Nummedal, D., 2000 : The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis. In Hunt, D. and Gawthorpe, R.L., eds. : *Sedimentary Response to Forced Regressions*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. No. 172, 1–17.
- Posamentier, H.W. and Allen, G.P., 1999 : *Siliciclastic Sequence Stratigraphy-Concepts and Applications*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 7, 210 p.
- Posamentier, H.W. and Morris, W.R., 2000 : Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits. In Hunt, D. and Gawthorpe, R.L., eds. : *Sedimentary Response to Forced Regressions*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. No. 172, 19–47.
- Posamentier, H.W., Erskin, R.D. and Mitchum, Jr., R.M., 1991 : Models for submarine-fan deposition within a sequence-stratigraphic framework. In Weimer, P., Link, M.H., eds. : *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*. New York, Springer, 127–136.
- Posamentier, H.W., Jervy, M.T. and Vail, P.R., 1988 : Eustatic control 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*. SEPM Spec. Publ. No. 43, 109–124.
- Posamentier, H.W., Allen, G.P., James, D.P. and Tesson, M., 1992 : Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **76**, 1687–1709.
- Snedden, J.W. and Bergman, K.M., 1999 : Isolated shallow marine sand bodies: Deposits for all interpretations. In Bergman, K.M. and Snedden, J.W., eds. : *Isolated Shallow Marine Sand Bodies: Sequence Stratigraphic Analysis and Sedimentologic Interpretation*. SEPM Spec. Publ. No. 64, 1–11.

- Sydow, J. and Roberts, H.H., 1994. Stratigraphic framework of a Late Pleistocene shelf-edge delta, northern Gulf of Mexico. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **78**, 1276-1312.
- Suter, J.R. and Berryhill, Jr., H.L., 1985 : Late Quaternary shelf-margin deltas. Northwest Gulf of Mexico. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **69**, 77-91.
- Tesson, M., Gensous, B., Allen, G.P. and Ravenne, Ch., 1990 : Late Quaternary deltaic lowstand wedges on the Rone continental shelf, France. *Mar. Geol.*, **9**, 325-332.
- Tilliman, R.W. and Martinsen, R.S., 1984 : The Shannon sandridge sandstone complex, Salt Creek anticline area, Powder River Basin, Wyoming. In Tilliman, R.W. and Siemers, C.T., eds. : *Siliciclastic Shelf Sedimentation*. SEPM Spec. Publ. No. 34, 85-142.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campion, K.M. and Rahmanian, V.D., 1990 : *Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops*. AAPG Methods in Exploration Series No. 7, 55 p.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, T.S., 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*. SEPM Spec. Publ. No. 43, 39-45.
- Vail, P.R., 1987 : Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. In Bally, A.W., ed. : *Atlas of Seismic Stratigraphy*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Stud. Geol. No. 27, 2-9.
- Walker, R.G. and Plint, A.G., 1992 : Wave- and storm-dominated shallow marine systems. In Walker, R.G. and James, N.P., eds. : *Facies Models: Response to Sea Level Change*. New Foundland, Geol. Assoc. Can., 219-238.
- Willis, B.J. and Gabel, S., 2001 : Sharp-based, tide-dominated deltas of the Sego Sandstone, Book Cliffs, Utah, USA. *Sedimentology*, **48**, 479-506.