新しい平衡河川観：モデル実験が描く下流域沖積系の海水準応答

A new view of fluvial grade revealed by model experiments: alluvial response in the lower reaches of rivers to sea level

武藤鉄司*

Tetsuji Muto*

2008 年 7 月 17 日受付.

2010 年 6 月 20 日受理.

* 長崎大学大学院生産科学研究科
Graduate School of Science and Technology,
Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi,
Nagasaki 852-8521, Japan

Corresponding author; T. Muto,
tmuto@nagasaki-u.ac.jp

Abstract

A graded river conveys its sediment load without net deposition or net erosion. A correct understanding of grade is fundamental in genetic stratigraphy, because it represents the critical condition that discriminates between aggradational and degradational regimes in river systems. Conventional wisdom regarding fluvial grade in the alluvial lower reaches of a river emptying into the sea is that global (or large-scale) grade controls the final stable state of alluvial systems, representing an equilibrium response to steady external forcing (i.e., stationary sea level). However, results of recent experimental and numerical modeling of alluvial-deltaic depositional systems conducted by the author's research group have shown that (1) the alluvial lower reaches of a river are capable of attaining grade only under conditions of falling sea level (not sea level standstill); (2) for grade to be attained and sustained, the falling sea level must follow a particular pattern that depends in part upon the alluvial and subaqueous basal slopes (α and ϕ respectively); and (3) there exist two different kinds of grade: 'allogenic grade' attained by the non-equilibrium response to a decelerating fall in sea level ($\alpha < \phi$), and 'auto-genic grade' attained via the equilibrium response to a steady fall in sea level at any constant rate ($\alpha = \phi$). Where $\alpha > \phi$, the river never attains grade but continues to aggrade under all conditions of relative sea-level fall. The next generation of genetic stratigraphy models, particularly of alluvial-deltaic depositional systems, should take into account this new view of fluvial grade.

Keywords: autostratigraphy, fluvial grade, genetic stratigraphy, non-equilibrium response, sea level

はじめに

平衡河川 (graded river) とは、堆積物 (sediment) の輸送が行われているにも関わらず堆積も侵食も実質的に起こらない河川のことである。Gilbert (1877) の研究を端緒とし後の研究者らによって広まったこの概念は地質学における最も古典的な概念の一つでありながら、実のところ最も捉えがたい概念でもあった。平衡河川は物理的に可能か否かといったその根幹に関わる問題すらごく最近にいたるまで判然としなかったのである。平衡河川は仮想に過ぎないとする懐疑的な意見はいまも根強い (Johnson and Beaumont, 1995; Muto and Steel, 2000)。一方で、1970 年代後半以降の成因論的層序学 (genetic stratigraphy) を牽引してきたシークウェンス層序学は平衡河川概念をその理論構成の基軸に据えてきた (Posamentier et al., 1988; Shanley and McCabe, 1994; Posamentier and Allen, 1999)。平衡河川の理解が成因論的層序学においてきわめて基礎的かつ重要なものは、平衡河川こそ河川系における埋積レジム (aggrada-

tional regime) と削剥レジム (degradational regime) の境界条件の具現に他ならないからだ。後述するように、下流域沖積系 (デルタ陸上領域を含む) における平衡河川の実現について考察することは海水準フォーシングに対する河川系応答の根本を探究することでもある。しかし、シークウェンス層序学が依拠する平衡河川観は 19 世紀以来の半ば思弁的な見解をほぼそのまま踏襲してきたにすぎない。平衡河川が単なる仮説から地形ダイナミクス (morphodynamics) 上の意味を有する実体へと変貌を遂げ始めたのは 2005 年以降のことである (Muto and Swenson, 2005a)。筆者らの研究グループがモデル実験と理論的検討に基づいて提案した平衡河川の理解 (Table 1) は、成因論的層序学の新しい枠組み—オート層序学 (autostratigraphy)—を導くに至った (Muto et al., 2007)。本論文は、筆者らが描いている新しい平衡河川観の俯瞰であると同時に、それが今後の成因論的層序学の展開に及ぼす影響についての考察である。議論の対象は下流域沖積系に限られる。

Table 1. Comparisons between conventional and recently developed views of fluvial grade in the alluvial lower reaches of rivers.

	CONVENTIONAL VIEW	NEW VIEW
What is grade?	final stable stage of river evolution	manifestation of the condition to discriminate between alluvial aggradation and degradation
Function of sea level	erosional base level	level to control relative height of subaerial-subaqueous geometrical contrast
Sea level condition	standstill	fall of a particular pattern
Topographic condition	---	alluvial slope (α) $\leq$ subaqueous basal slope (ϕ)
Fluvial response to attain grade	equilibrium response	non-equilibrium response ($\alpha < \phi$) or equilibrium response ($\alpha = \phi$)
River bed profile	concave-upward smooth curve	straight line
Subaerial accommodation	controlled by grade	irrelevant (conceptual flaw)
Related frameworks of genetic stratigraphy	sequence stratigraphy, regime model, etc.	autostratigraphy

堆積系モデル実験の目的と意義

平衡河川の議論に入る前に、堆積系モデル実験一般の目的と意義について述べておきたい。天然堆積系と実験室内で造る堆積系とで、幾何学的相似、力学的相似、運動学的相似のいずれも同時に満たすスケリングは不可能である。それにも関わらずモデル実験が地層地形形成過程の理解に役立つと考えられているのは、モデル実験の目的が天然堆積系のアナログを生成することではなく、天然堆積系における現象を理解するための解析にこそあるからである (Paola et al., 2001)。天然堆積系では無数とも言えるパラメータが複雑かつ複合的に機能しあうために、また層序記録の本質的不完全性 (Sadler, 1981; Ager, 1993) のために、観察された地層や地形から特定のフォーシングの特定の機能を読み取ることは一般に難しい。それを可能にするには、他のフォーシングを固定したまま特定の一つのフォーシングを特定のパターンで変化させて堆積系がどのように応答するかをよく理解しておかねばならない。この作業は天然堆積系ではむろんでできないが、モデル実験であれば容易におこなえる。実際、規模の小さなモデル実験であっても、天然における堆積系の発達過程や層序を巧妙に説明し、また一部の現象の根幹を定性的もしくは準定量的ながら捉えていることは少なくない (Heller et al., 2001; Paola et al., 2001; Muto and Steel, 2001; Cazanacli, et al., 2002; Sheets, et al., 2002; Parker and Muto, 2003; Kim et al., 2006, 2009; Kim and Muto, 2007; Parker et al., 2008a, 2008b; Paola et al., 2009)。堆積系モデル実験の意義はまさにこの点にある。

本論文で紹介する平衡河川の新しい理解も、その多くはモデル実験から導かれたものである。筆者らがおこなったモデル実験の設計や条件は一樣ではないが、海水準フォーシング

の基準面 (base level) としての機能だけを問題にしているという点では共通する。給砂速度や (砂を輸送するための) 水流量などは個々の実験のそれぞれで一定に保たれ、波浪や潮汐などの堆積物分散営力は取り入れられなかった。このような設定に関して「世界の本当の姿を反映しておらず、非現実的ではないか」と評する意見がもしあるとすれば、それはモデル実験の目的を誤解した意見であると言わざるを得ない。海水準の基準面としての機能に対して下流域沖積河川系がどのように応答するかを調べるには、海水準フォーシングをそれ以外のフォーシングから完全に分離させることが必要なのであり、それを全うするからこそ基準面の機能について意味のある知見が得られるのである。新しい平衡河川観とは、要するに、海水準フォーシングの基準面機能に対する下流域沖積系の応答様式についての、ひとまとまりの新しい理解のことを指している。

平衡河川とは何か

1. 動的平衡状態としての平衡河川

河川系内の適当に長い区間において、また適当な時間平均で見て、その上流端と下流端とで堆積物流量 (sediment discharge) が等しい状況を考える。これは堆積物の出入りがあるにも関わらず区間内に存在する堆積物の量が時間的に変わらない状態であるから、堆積物に関する動的平衡状態 (dynamic equilibrium state) に他ならない。この状態を河川平衡 (fluvial grade) といい、当該区間を平衡河川と呼ぶ。区間へ流入する堆積物と区間内の既存物質とのあいだで交換が起こってもよい。また、河床が局所的あるいは一時的に侵食もしくは堆積を経験することがあってもよい。適当に長い時間で観たときに一つの系として動的平衡が実現していればよく、その時間スケールはオート層序学の枠組みの中で

議論されている (Muto et al., 2007). なお, 研究目的によっては局所区間での平衡 (local grade) を想定することがあるが, 本稿の議論は区間全体にまたがる平衡 (global grade) を対象とする.

堆積物に関する動的平衡状態として平衡河川を捉えた場合, 可動床を可能にする沖積堆積物 (alluvium) の存在が必要である. 一時的な侵食 [堆積] が起こったときに平衡状態を回復する堆積 [侵食] を生じるためには河床に既存堆積物が用意されていなければならないからだ. 平衡状態の実現は岩盤河川 (bedrock rivers) よりも沖積河川 (alluvial rivers) において想定される. 本論文における議論の対象は海に注ぐ下流域沖積河川系である. その上流端に沖積-基盤遷移点 (alluvium-basement transition), 下流端にデルタ海岸 (deltaic shoreline) をそれぞれ想定する.

2. 平衡河川の自己調節機能

平衡河川では堆積も侵食も実質的に起こらないのだから, 上流側からもたらされた堆積物は実質そこを素通りするだけである. したがって, いったん平衡に到達した河川系では, そこに作用するフォーシングが変わらない限り, その河川区間の勾配, 高度, 縦断形はもはや変化しないだろう. このような見地から, 平衡河川は河川系進化の最終段階かつ究極の安定状態とみなされることが多かった (Davis, 1902; Green, 1936; Kesseli, 1941; Leopold and Bull, 1979; Posamentier and Vail, 1988; Thorne and Swift, 1991a). 平衡河川の安定性は沖積河川系に内在する自己調整機能で担保されると信じられている. 自己調整に関わるパラメータは河床勾配, チャネル形態, 河床物質の粒径などである (Schumm, 1977; Wescott, 1993). 定常的な堆積物流量, 定常的な水流量, 与えられた基準面のもとで平衡状態を持続させるように河川勾配および他のパラメータが互いに調節し合うように機能する河川—それが平衡河川である (Mackin, 1948; Leopold and Maddock, 1953; Schumm, 1977). 堆積物流量や水流量の変化は平衡状態を一時的に擾乱するが, 擾乱の結果それ自体が原因となって平衡状態を回復する負のフィードバックが働くというのである.

3. 平衡河川の縦断形

沖積河川の河床勾配を規定する主要因の一つは水流量と堆積物流量の比率である. もしこの比率が下流方向へ変わらなければ, 平衡河川は一樣勾配すなわち直線的縦断形をもつ (Parker, 1977). 平衡河川に固有の縦断形として, 指数関数 (Krumbein, 1937; Strahler, 1952; Yatsu, 1955) や対数関数 (Jones, 1924; Green, 1936; Woodford, 1951; Nummedal et al., 1993) で近似できる滑らかで上方に凹型の河床縦断形がしばしば挙げられるが, これらは少なくとも下流域沖積系の平衡河川プロファイルには当てはまらない. 河川工学の分野では, 河床勾配と堆積物流量・水流量の関係 (流砂量式) を実験的に調べる際に平衡河川が造られる. そのためには水路の下流側に堰を設けてそこを下流端位置とする非デルタの沖積河川を造るか (秋山・武藤, 2006), もしくは静止水位のもと大きな落差に遮られてそこより沖方向へ前進できない河川デルタを造る (Parker, 1977). 前者は沖

積河川の下流端が, 後者はデルタトゥ (delta toe) がそれぞれ固定境界 (fixed boundary) となる. このように固定境界をもつ系であれば平衡河川を容易に実現できる (その縦断形は直線的である). しかし天然では沖積河川下流端 (= 海岸線) もデルタトゥも移動境界 (moving boundary) であって, 特定の位置に固定されない. 従来からあった平衡河川についての懐疑論は, 固定境界をもたない下流域沖積系は平衡河川を実現できないという主張に他ならない.

平衡応答を基調にした平衡河川観

従来の成因論的層序学における基礎原理の一つは平衡応答 (equilibrium response) の仮説である. それは, (1) 堆積系には一般に平衡形態 (equilibrium configuration) が存在し, (2) 定常的フォーシングのもとで堆積系は平衡形態を獲得する方向へ進化する, (3) 平衡形態を獲得した後はそれを持続し定常的に挙動し続ける, といった考えのことである. シークウェンス層序学の中心的概念であるアコモデーションも, シークウェンス層序学が登場する前から学界を支配していた A/S 比説 (A/S ratio concept) も, また下流域沖積系における平衡河川の実現も, すべては平衡応答の枠組みの中で理解されてきた.

1. 海水準の機能と陸域アコモデーション

従来, 海水準の侵食基準面としての機能に留意するあまり, 海水準より高い場所は剥蝕域, 海水準より低い場所は埋積域と捉えられてきた. アコモデーション概念はまさしくその捉え方に従ったものである. アコモデーションとは「潜在的な堆積物の蓄積に利用可能な空間」のことで (Jervey, 1988), シークウェンス層序学では堆積物が滞留し地層として保存されるためにはそこにアコモデーションがなければならぬと考える. 海域におけるアコモデーションは海水準と海底面で挟まれた空間 (Jervey, 1988; Posamentier et al., 1988), 陸域におけるアコモデーションは平衡河川プロファイルと既存河川プロファイルで挟まれた空間 (Posamentier et al., 1988; Shanley and McCabe, 1994; Posamentier and Allen, 1999) とそれぞれ想定されている.

陸域アコモデーションの大きさ—河川系が平衡状態からどれほど隔たっているか—は下流域沖積系の層序構造 (stratigraphic architecture) に大きな影響を及ぼすらしい. 陸域アコモデーションが十分に小さければ沖積系における堆積量はほとんど粗粒物質に限られチャネル堆積物が上下方向および側方方向にアマルガメイトして産する, 陸域アコモデーションが十分に大きければ細粒物質も沖積系に保存されるので細粒氾濫原堆積物中に粗粒なチャネル堆積物が孤立するかたちで産する, といった意見はよく聞かれる (Wright and Marriot, 1993; Currie, 1997; Martinsen et al., 1999). 陸域アコモデーションが下流域沖積系の堆積量を規定するとすれば, それは同時に海域への堆積物供給量も規定する. 河川が平衡に到達していればその供給するすべての堆積物は海域に堆積し, また河川が平衡から遙かに隔たっていれば海域への堆積物供給量は小さい, と考えるわけである.

さて, 海水準変動と平衡河川の関係は平衡応答の観点から

次のように理解されている (Posamentier et al., 1988; Posamentier and Vail, 1988; van Wagoner et al., 1990; Shanley and McCabe, 1994; Holbrook et al., 2006). (1) 平衡河川は静止海水準のもとで実現する. 海水準が静止し続ける限り, 平衡は持続する. (2) 上昇海水準のもとで下流域沖積系は埋積レジムを持続し, 仮想される平衡河川プロファイルは上方へ移動する. これによって陸域アコモデーションが増加し, このアコモデーションが飽和するまで下流域沖積系は埋積レジムを持続する. (3) 下降海水準のもとで下流域沖積系は削剥レジムを持続し, 仮想される平衡河川プロファイルは下方へ移動する. そこにある陸域アコモデーションは減少する. 新たな平衡河川プロファイルよりも高い位置にある堆積物は適当に長い時間が経てば削剥され層序記録に残らない. このように, 特定の海水準フォーシング (上昇, 静止, 下降) に対して下流域沖積系は一義的に定まる特定の挙動 (埋積, 平衡, 削剥) をとるように応答する, と説明するのが平衡応答の仮説である.

2. A/S 比説

成因論的層序学の世界でよく知られている A/S 比説 (Schlager, 1993; Muto and Steel, 2000; Kim et al., 2006) は平衡応答の仮説そのものである. A はアコモデーション速度 (実際には海水準上昇速度が与えられることが多い; Jervey, 1988), S (>0) は後背地から下流域沖積系へもたらされる堆積物の単位時間あたり供給量を表す. A/S 比説は, A と S が大小関係にあり, それらの比の値が決まれば堆積系の挙動が一律に定まり, 与えられた A/S 比に対応する一定の形態 (平衡形態) で落ち着くと考える (Fig. 1). $A/S > 1$ ならば海進, $A/S < 1$ ならば海退が起こる. $A/S = 1$ ならばデルタ海岸線は陸側にも海側にも移動せず上方へのみ動く (Neal and Abreu, 2009). $A/S < 0$ ならば下流域沖積系は削剥もしくは下刻を経験する (Shanley and McCabe, 1994). このような考え方に立つと, 例えば, 「海退から海進への遷移が起こったのは A/S 比の増加を反映する」, 「埋積レジムから削剥レジムへの遷移が起こったのは海水準上昇 ($A > 0$) が海水準下降 ($A < 0$) に転じたためだ」といったたぐいの解釈が提供される. 河川デルタ系の定常的変遷は定常的フォーシング ($A/S = \text{一定}$) が機能した結果であり, 非定常的変遷は非定常的フォーシングの反映である, というわけだ. この A/S 比説の枠組みのなかで, 平衡河川は $A/S = 0$ ($S > 0$) で特徴づけられる定常的フォーシングすなわち静止海水準への平衡応答の結果と位置づけられている. 平衡河川は静止海水準のもとで実現する河川系の平衡形態である, と考えるのである.

A/S 比説のルーツは近代地質学の父 James Hutton (1726–1797) の学説まで遡れるという (Schlager, 1993). しかし A/S 比説を現在のそれとほぼ同じ意味で述べたのは Grabau (1913) が最初の人であろう. Grabau 以降, A/S 比説は成因論的層序学における中心原理として数多くの研究者に受け入れられてきた (e.g., Weller, 1960; Van Andel and Curray, 1960; Sloss, 1962; Curray, 1964; Curtis, 1970; Swift et al., 1971). シークウェンス層序学が提唱さ

Fig. 1. The A/S ratio concept as a key principle of conventional genetic stratigraphy. The A/S ratio governs the particular style of sedimentation and morphology (equilibrium configuration) of the alluvial-deltaic system. Any significant changes in the stratigraphic patterns of river deltas observed in the stratigraphic record are attributed to temporal changes in A/S ratio. Modified from Shanley and McCabe (1994).

れるはるか前から学界の常識だった A/S 比説が, Exxon Group による震探シークウェンス層序学 (Vail et al., 1977; Mitchum et al., 1977a, b; Brown and Fisher, 1977), さらにシステムズトラクトモデル (Posamentier and Vail, 1988; Neal and Abreu, 2009) へと繰り込まれたのは自然な流れだったと言えなくもない. A/S 比説は非デルタ環境にも適用された. 例えば, 内陸河川系 (e.g., Shanley and McCabe, 1994), エスチュアリ系 (e.g., Dalrymple et al., 1992; Ainsworth and Walker, 1994), 開析谷系 (e.g., Thomas and Anderson, 1994; Zaitlin et al., 1994; Talling, 1998), 深海堆積系 (e.g., Feeley et al., 1990; Kolla and Perlmutter, 1993; Steel and Olsen, 2002) などである. レジメ理論 (Swift and Thorne, 1991; Thorne and Swift, 1991a, b), 成因論的シークウェンス層序モデル (Galloway, 1989a, b), 海岸線軌跡モデル (Helland-Hansen and Gjelberg, 1994; Helland-Hansen, 1995; Helland-Hansen and Martinsen, 1996) など, Exxon Group のシークウェンス層序モデルとは一線を画していたはずの枠組みも, 多くは A/S 比説を基礎原理に据えていた. 要するに, 従来の成因論的層序学はおしなべて平衡応答を基調にしていたのである.

新しい平衡河川観

筆者と共同研究者による一連のモデル実験で得られた重要な知見の一つは下流域沖積系における非平衡応答 (non-equilibrium response) の一般性である (Muto et al., 2007). 非平衡応答の理解は新しい平衡河川観の出発点になった.

1. 下流域沖積系の非平衡応答

定常的フォーシングに対して堆積系が特定の挙動や形態に落ち着くことがないまま変遷し続けることを非平衡応答とい

Fig. 2. Relationship between relative sea-level change and alluvial state for three different conditions. Curves separating aggradational and degradational phases represent grade (A, B). Modified from Petter and Muto (2008).

う (Muto and Swenson, 2005a; Muto et al., 2007). 非平衡応答の最もわかりやすい例はデルタ海岸線の自動後退 (autoretreat) であろう。海水準上昇速度一定で特徴づけられる定常的フォーシングのもとで、デルタ海岸線は初め前進するがやがて後退に転じ (Muto and Steel, 1992, 1997; Milton and Bertram, 1995; Swenson et al., 2000), 後退開始後の有限時間内に系全体のジオメトリと堆積過程が劇的に変わる転換的事件 (autobreak) を迎えて非デルタ化する (Muto, 2001; Parker and Muto, 2003; Akamatsu et al., 2005; Parker et al., 2008a, b). デルタは特定の形態や挙動で落ち着くことがないまま最後に破綻を迎えるように応答するのである。

海水準下降に対する下流域沖積系の非平衡応答の理解は新しい平衡河川観へのヒントになった。デルタトゥがダウンラップする海底斜面の勾配 (ϕ) よりもデルタ上の沖積勾配 (α) が小さいセッティングのもとで海水準が一定速度で下降するとき、沖積河川は初め埋積レジムにあり、後に削剥レジムに推移する (Muto and Steel, 2002a, 2004; Swenson and Muto, 2005, 2007)。海水準下降のもとでも埋積レジムが支配する期間が必然的に現れるのであり、「海水準下降ならば削剥」といった一義的關係は存在しない。沖積-基盤遷移点の挙動を指標にしたときの埋積レジムから削剥レジムへの必然的転換をオートインシジョン (autoincision) と呼ぶ (Muto and Steel, 2002a, 2004)。もしオートインシジョンが河川平衡の一時的な実現であるなら、オートインシジョンを強制的に持続させることで恒常的な平衡河川を造り出せるだろう。平衡河川の実現時期を海水準下降期とする予想は以前にも表明されていた (Nummedal et al., 1993; Schumm, 1993; Leeder and Stewart, 1996)。問題は固定境界を持たないデルタ上の沖積河川が平衡を持続しうのような海水準下降のパターンが物理的に可能か否かであるが、この点は依然として不確かであった。

2. アロジェニックな平衡河川

Muto and Swenson (2005a) は、地形条件 $\alpha < \phi$ のもとで沖積河川が平衡状態を持続する場合に満たされるべき条件

を考え、地形ダイナミクスモデルを作った。そのモデルの述べるところによれば、平衡状態の実現は相対的海水準の下降期に限られ、しかも海水準下降速度は時間の平方根の逆数に比例するパターンで減速せねばならない (Fig. 2A)。Fig. 3 は、そのような水位下降パターンのもとで、固定境界を持たない平衡河川を生成した実験の一例である。この実験は、平均粒径 0.2 mm の均質な天然石英砂 (豊浦砂) を用いて、給砂量一定、水流量一定のもとでおこなわれた。Fig. 3 の画像を互いに重ね合わせると、トップセットが欠如し、削り込みの痕跡もない、デルタ水中斜面堆積物だけからなる層序断面が得られる (Muto and Swenson, 2005a)。デルタ上の沖積河川は埋積と削剥を経験することなく海側へ延伸しただけであった。それはまさしく平衡河川である。

ところで、削剥が起こらない条件のもとであれば、堆積物流量の逆数と相対的海水準の変動速度は与えられた長さスケールに関して同じ機能を持ち、一方が特定されなければ他方も特定できない関係にある (Muto and Steel, 2002b)。もし海水準下降速度を一定に保ちつつ、堆積物流量を時間的に変えることで平衡河川を実現・維持させるなら、堆積物流量は時間の 2 乗に比例するパターンで増加し続けなければならない。地形条件 $\alpha < \phi$ のもとで平衡河川が実現・持続するためには、海水準下降速度もしくは堆積物流量が特定のパターンに従って変遷する必要があるのだ。このように非定常的フォーシングのもとで非平衡応答によって実現する平衡河川をアロジェニックな平衡河川 (allogenic grade) と呼ぶ (Muto and Swenson, 2005b)。その特定パターンにしばらく従った後でそこから逸脱するなら、河川系はその時点で平衡状態を喪失し、埋積か削剥のいずれかを経験する。この場合平衡の回復はフォーシングの当初変動パターンへの回帰を必要とする。河川系に内在する自己調整機能は平衡の回復になんら寄与しない。

3. オートジェニックな平衡河川

上の議論で、平衡河川の実現と持続が海水準下降速度の減速 (ただし堆積物流量一定) を必要とする理由は次のように説明することもできる。地形条件 $\alpha < \phi$ のもとで前進過程に

あるデルタは、その水中斜面長を時間とともに増加させる傾向にある。平衡が実現していれば、沖積河川は一樣勾配値 α を保ったまま海側へ延伸する。延伸速度は海水準下降速度に比例する。しかし、海岸線を通る堆積物の流量が一定ならばデルタ水中斜面長の増加を補償するために延伸速度はしだいに減少せざるをえない。つまり、平衡状態の持続は海水準下降速度の減速を必要とする。このように考えると次の類推に至る。もし $\alpha=\phi$ ならば、デルタが前進してもその前縁の水深が変わらないのでデルタ水中斜面長は一定となる、したがって海水準下降速度が一定のもとであれば平衡河川が実現・持続しうるのではないか。Muto and Swenson (2005b)はこの予想を記述する幾何モデルを作り、平衡河川の実現と持続を可能にする海水準下降速度が何に規制されるかを調べた。そのモデルからはさらに次のような知見が示唆される。海水準下降速度と堆積物供給速度の大きさは平衡河川が実現したときのデルタ水中斜面長の大きさを決定づけるように機能する。海水準下降速度がどんな大きさであろうとそれが時間的に不変でありさえすれば、相応のデルタ水中斜面長のもとで平衡河川が実現する。海水準下降速度と堆積物流量それぞれの大きさ（ただし時間的に一定）は平衡河川の実現の可否それ自体に影響を及ぼさない。

このような理論的予想はモデル実験で確かめられた (Muto and Swenson, 2006)。Fig. 4は、急激な水位上昇とその後の一定速度の水位下降の4回の繰り返しによって累重させた河川デルタの層序断面を表している。ここに見られるのはすべてデルタ水中斜面上に付加された地層であり、河川成の地層はない。互いに平行するセット間の境界が平衡河川の痕跡を表している。地形条件 $\alpha=\phi$ のもとでの下流域沖積系は、与えられた海水準下降速度のもとで平衡を実現するように自らデルタ水中斜面長やデルタセットの厚さを調整する。海水準下降速度一定で特徴づけられる定常的フォーシングに対して河川デルタ系が文字通り平衡応答することで有限時間内に平衡河川を実現するのである。このように、定常的フォーシングに対する平衡応答の結果として実現する平衡河川をオートジェニックな平衡河川 (autogenic grade) と呼ぶ (Muto and Swenson, 2005b; Fig. 2B)。

4. 平衡河川が実現しない地形条件

地形条件 $\alpha>\phi$ のもとでは平衡河川は実現しない。海水準がどんな速度で下降しても河川系は埋積レジムを持続する (Petter and Muto, 2008; Fig. 2C)。デルタは前進すればするほど、その前縁海域の水深が浅くなり、デルタ水中斜面長

Fig. 3. (←) Sequential photographs of a flume experiment in which allogenic grade was attained. The experiment was conducted with constant water discharge and constant sediment discharge. The flume was 1.0 cm wide. Values in each panel represent the experimental run time (in seconds). The rate of sea level fall was constant for the first 520 s and subsequently decelerated in inverse proportion to the square root of time. The alluvium-basement transition remained stationary after 720 s. Modified from Muto and Swenson (2005a).

Fig. 4. Autogenically graded river profiles produced in a series of experiments. Upstream water discharge and sediment discharge were kept constant throughout the entire series. The flume was 2.0 cm wide. Rates of sea level fall were constant during each run but magnitudes varied (see the inset diagram). Parallel river profiles reflect autogenic grade that was attained with sea level falling at different constant rates. For details on the experimental conditions, see Muto and Swenson (2006).

を減少させていく。やがて沖積河川下流端が海岸線から乖離し、デルタの系は破綻（非デルタ化）する。この現象をオートデタッチメント（autodetachment）という。オートデタッチメントを経験した後の系は海水準による規制から解放されるため、それ以降海水準がどんな速度で下がろうとその影響は及ばず、埋積だけが進行する。海水準低下速度の大きさはデルタが成長を開始してからオートデタッチメントを迎えるまでの時間とそのときの系のサイズを決めるだけで、オートデタッチメントの実現の可否そのものには影響を及ぼさない。非デルタ化する前の段階でも埋積一辺倒であることはモデル実験で確かめられた（Petter and Muto, 2008）。

成因論的層序学へのインパクト

成因論的層序学の主目的は地質学的過去の堆積系で生じた事件や変遷を層序記録から解読するための方法論を確立することにある。堆積系に関与する外部フォーシングに何らかの変化が起こったことを主張するには、変化が起こらなかった場合の仮想的な結果と比較して初めて可能になる。そのような論理作業が従来の成因論的層序学に欠如していたのは、平衡応答の仮説が堆積地質学における暗黙の公理だったからだ。フォーシングが変わらないならば持続する平衡形態のと同じ地層累重様式が保たれ、地層累重様式に現れる変化はフォーシングの変化を反映する、と考えることが従来の常識であり（上述）、そして旧来の平衡河川観はこの常識の中核であった。

下流域沖積（～デルタ）系における従来の成因論的層序学では、海水準の侵食基準面としての機能に留意するあまり、海水準より高い場所は削剥域、海水準より低い場所は埋積域とみなされるのがふつうであった。しかし、平衡河川の実現が海水準下降期に限られる以上、そのような捉え方はもはや合理性を伴わない。海水準の最も重要な機能は巨視的に観た場合の海域－陸域間の斜面変換点の高度を規制することであって（Muto et al., 2007）、侵食基準面としての機能は強

調されるべきでない。静止海水準と上昇海水準のもとでは平衡河川が実現することはなく、下流域沖積系は際限なく埋積するばかりである（Kim et al., 2009）。ゆえに陸域アコモデーションは定義されない。平衡河川が実現する海水準下降期であっても、平衡曲線（例えばFig. 2Aで埋積領域と削剥領域を分ける境界線）よりも常に上側で海水準が推移するなら、やはりその河川系の埋積には限界がない。平衡曲線よりも上側の領域で海水準が推移するとき、定義上そこには陸域アコモデーションが存在しないに関わらず、下流域沖積系は埋積し続け、その堆積物は地層として保存されるのである。アコモデーションは反アコモデーション（anti-accommodation）との境界が認定されて初めて意味をもつが（Muto and Steel, 2000）、上の議論は反アコモデーションもアコモデーションの一部にならざるをえないという論理矛盾を指摘している。

陸域アコモデーションを平衡河川で規定することのもう一つの大きな問題は、平衡河川の非安定性である。非平衡応答で実現するアロジェニックな平衡河川の場合、海水準フォーシングが特定パターンから逸脱した場合に河川は平衡を回復する方向へ自己調整しない。非平衡状態であっても河川系はその状態を安定的に持続しうるのであり、平衡河川は「河川系進化の最終的かつ究極的安定状態」ではない。平衡応答で実現するオートジェニックな平衡河川ならば平衡状態を持続・回復する方向へ自己調整するので、それは海水準下降速度一定のもとでの平衡形態だと言える。しかし、海水準が下がっていくときにしか存在しないアコモデーションはシークウェンス層序学が本来想定していたそれとは異なるものである。

ま と め

平衡河川は下流域沖積系における埋積レジムと削剥レジムの境界条件を具現するものであるから、その理解は成因論的層序学において重要かつ基礎的である。下流域沖積系にお

る平衡河川の実現について考察することは海水準フォーシングに対する河川系応答の根本を探究することでもある。

従来の成因論的層序学は、下流域沖積系における平衡河川の実現を静止海水準に対する平衡応答の結果とする誤った考えを基礎にして構築されてきた。平衡河川の実現は海水準下降期に限られるのであり、それを可能にする海水準下降パターンは地形条件に強く依存する。また地形条件により、平衡状態の実現を導く河川系の応答様式が大きく異なる。一般には、下流域沖積系は海水準フォーシングに対して非平衡応答すると考えるべきである。新しい平衡河川観の登場により、成因論的層序学はその根幹のところで大きな転換を求められている。転換作業を推進するに際して非平衡応答の理解を深めることが必須である。

謝 辞

本稿は、筆者と John B. Swenson, Ron J. Steel, Andrew L. Petter が共同で開拓した下流域沖積系の新しい平衡河川観について、そのエッセンスを筆者の言葉でまとめたものである。Gary Parker, Chris Paola, Wonsuck Kim 各氏との示唆と洞察に富んだ討論はこの古典的問題を解き明かすうえできわめて有益であった。2名の匿名査読者および編集委員の宮田雄一郎氏による建設的批評は原稿の改良に大いに役立った。本特集号への投稿を勧めてくださった横川美和氏に感謝する。本研究の一部に平成 15~18 年度科学研究費補助金（基盤研究（B）課題番号 15340171）を使用した。

文 献

- Ager, D. V., 1993, *The Nature of the Stratigraphical Record*, Third Ed. John Wiley, Chichester. 151p.
- Ainsworth, R. B. and Walker, R. G., 1994, Control of estuarine valley-fill deposition by fluctuations of relative sea-level, Cretaceous Bearpaw-Horseshoe Canyon Transition, Drumheller, Alberta, Canada. In Dalrymple, R. W., Boyd, R. and Zaitlin, B. A., eds., *Incised-valley systems: origin and sedimentary sequences*, SEPM Spec. Publ., **51**, 159–174.
- Akamatsu, Y., Parker, G. and Muto, T., 2005, Effect of sea level rise on rivers flowing into the ocean: application to the Fly-Strickland river system, Papua New Guinea. In Parker, G. and Garcia, M. H., eds., *River, coastal and estuarine morphodynamics*, Vol. 2, Taylor and Francis, London, 685–695.
- 秋山美奈子・武藤鉄司 (Akiyama, M. and Muto, T.), 2006, 下流域沖積河川系における河岸段丘の形成機構: 水路実験による河川系複雑応答の検証. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **112**, 315–330.
- Brown, L. F., Jr. and Fisher, W., 1977, Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: Examples from Brazilian rift and pull-apart basins. In Payton, C. E., ed., *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir **26**, 213–248.
- Cazanaceli, D., Paola, C. and Parker, G., 2002, Experimental steep, braided flow: Application to flooding risk fans. *Jour. Hydraul. Engineer.*, **128**, 1–9.
- Curry, J. R., 1964, Transgressions and regressions. In Miller, R. L., ed., *Papers in marine geology*, Macmillan, New York. 175–203.
- Currie, B. S., 1997, Sequence stratigraphy of nonmarine Jurassic-Cretaceous rocks, central Cordilleran foreland-basin system. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **109**, 1206–1222.
- Curtis, D. M., 1970, Miocene deltaic sedimentation, Louisiana Gulf Coast. In Morgan, J. P., ed., *Deltaic sedimentation, modern and ancient*, SEPM Spec. Publ., **15**, 293–308.
- Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A. and Boyd, R., 1992, Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Jour. Sed. Petrol.*, **62**, 1130–1146.
- Davis, W. M., 1902, Base-level, grade, and peneplain. *Jour. Geology.*, **10**, 77–111.
- Feeley, M. H., Moor, T. C., Jr., Loutit, T. S. and Bryant, W. R., 1990, Sequence stratigraphy of Mississippi Fan related to oxygen isotope sea level index. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **74**, 407–424.
- Galloway, W. E., 1989a, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis—part I: architectures and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **73**, 125–142.
- Galloway, W. E., 1989b, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis—part II: application to Northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **73**, 143–154.
- Gilbert, G. K., 1877, *Geology of the Henry Mountains*. Washington, D. C., Government Printing Office, 170p.
- Grabau, A. W., 1913, *Principles of stratigraphy*. A. G. Seiler, New York, 1185p.
- Green, J. F. N., 1936, The terraces of southernmost England. *Quart. Jour. Geol. Soc. London*, **92**, LVIII–LXXXVIII (Presidential address).
- Helland-Hansen, W., 1995, Sequence stratigraphy theory: remarks and recommendations. In Steel, R. J., Felt, V. L., Johannessen, E. P. and Mathieu, C., eds., *Sequence stratigraphy on the Northwest European margin*, Norwegian Petrol. Soc. Spec. Publ., **5**, 13–21.
- Helland-Hansen, W. and Gjølberg, J. P., 1994, Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective. *Sed. Geology*, **92**, 31–52.
- Helland-Hansen, W. and Martinsen, O. J., 1996, Shoreline trajectories and sequences: description of variable depositional-dip scenarios. *Jour. Sed. Res.*, **66**, 670–688.
- Heller, P. L., Paola, C., John, B. and Hwang, I-G., 2001, Geomorphology and sequence stratigraphy due to slow and rapid base-level changes in an experimental subsiding basin (XES 96-1). *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **85**, 817–838.
- Holbrook, J., Scott, R. W. and Oboh-Ikuenobe, F. E., 2006, Base-level buffers and buttresses: A model for upstream versus downstream control on fluvial geometry and architecture within sequences. *Jour. Sed. Res.*, **76**, 162–174.
- Jervey, M. T., 1988, Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. 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., **42**, 47–69.
- Johnson, D. D. and Beaumont, C., 1995, Preliminary results from a plan-form kinematic model of orogen evolution, surface processes and the development of clastic foreland basin stratigraphy. In Dorobek, S. L. and Ross, G. M., eds., *Stratigraphic evolution of foreland basins*, SEPM Spec. Publ., **52**, 3–24.
- Jones, O. T., 1924, The upper Towy drainage-system. *Quart. Jour. Geol. Soc. London*, **80**, 568–609.
- Kesseli, J. E., 1941, The concept of the graded river. *Jour. Geology*, **49**, 561–588.
- Kim, W. and Muto, T., 2007, Autogenic response of alluvial-bedrock transition to base-level variation: Experiment and theory. *Jour. Geophys. Res.*, **112**(F), F03S14, doi: 10.1029/2006JF000561.
- Kim, W., Dai, A., Muto, T. and Parker, G., 2009, Delta progradation driven by an advancing sediment source: Coupled theory and experiment describing the evolution of elongated

- deltas. *Water Resources Res.*, **45**, W06428, doi: 10.1029/2008WR007382.
- Kim, W., Paola, C., Voller, V. R. and Swenson, J. B., 2006, Experimental measurement of the relative importance of controls on shoreline migration. *Jour. Sed. Res.*, **76**, 270–283.
- Kolla, V. and Perlmutter, M. A., 1993, Timing of turbidite sedimentation of the Mississippi Fan. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **77**, 1129–1141.
- Krumbein, W. C., 1937, Sediments and exponential curves. *Jour. Geology*, **45**, 577–601.
- Leeder, M. R. and Stewart, M. D., 1996, Fluvial incision and sequence stratigraphy: alluvial responses to relative sea-level fall and their detection in the geological record. In Hesselbo, S. P. and Parkinson, D. N., eds., *Sequence stratigraphy in British geology*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **103**, 25–39.
- Leopold, L. B. and Bull, W. B., 1979, Base level, aggradation, and grade. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **123**, 168–202.
- Leopold, L. B. and Maddock, T., 1953, Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U. S. Geol. Surv. Prof. Papers*, **252**, 57p.
- Mackin, J. H., 1948, Concept of the graded river. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **59**, 463–512.
- Martinsen, O. J., Ryseth, A., Helland-Hansen, W., Flesche, H., Torkildsen, G. and Idil, S., 1999, Stratigraphic base level and fluvial architecture, Ericson Sandstone (Campanian), Rock Springs Uplift, W. Wyoming, U.S.A. *Sedimentology*, **46**, 235–260.
- Milton, N. J. and Bertram, G. T., 1995, Topset play types and their controls. In Van Wagoner, J. C. and Bertram, G. T., eds., *Sequence stratigraphy of foreland basin deposits, outcrop and subsurface examples from the Cretaceous of North America*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir **64**, 1–9.
- Mitchum, R. M., Jr., Vail, P. R. and Sangree, J. B., 1977a, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In Payton, C. E., ed., *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir **26**, 117–133.
- Mitchum, R. M., Jr., Vail, P. R. and Thompson, S., III, 1977b, 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 to hydrocarbon exploration*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir **26**, 53–62.
- Muto, T., 2001, Shoreline autoretreat substantiated in flume experiments. *Jour. Sed. Res.*, **71**, 246–254.
- Muto, T. and Steel, R. J., 1992, Retreat of the front in a prograding delta. *Geology*, **20**, 967–970.
- Muto, T. and Steel, R. J., 1997, Principles of regression and transgression: the nature of the interplay between accommodation and sediment supply. *Jour. Sed. Res.*, **67**, 994–1000.
- Muto, T. and Steel, R. J., 2000, The accommodation concept in sequence stratigraphy: some dimensional problems and possible redefinition. *Sed. Geology*, **130**, 1–10.
- Muto, T. and Steel, R. J., 2001, Autostepping during the transgressive growth of deltas: Results from flume experiments. *Geology*, **29**, 771–774.
- Muto, T. and Steel, R. J., 2002a, In defense of shelf-edge delta development during falling and lowstand of relative sea level. *Jour. Geology*, **110**, 421–436.
- Muto, T. and Steel, R. J., 2002b, Role of autoretreat and A/S changes in the understanding of deltaic shoreline trajectory: a semi-quantitative approach. *Basin Res.*, **14**, 303–318.
- Muto, T. and Steel, R. J., 2004, Autogenic response of fluvial deltas to steady sea-level fall: Implications from flume-tank experiments. *Geology*, **32**, 401–404.
- Muto, T. and Swenson, J. B., 2005a, Large-scale fluvial grade as a non-equilibrium state in linked depositional systems: Theory and experiment. *Jour. Geophys. Res.*, **110**(F), F03002, doi: 10.1029/2005JF000284.
- Muto, T. and Swenson, J. B., 2005b, Controls on alluvial aggradation and degradation during steady fall of relative sea level: Flume experiments. In Parker, G. and Garcia, M. H., eds., *River, coastal and estuarine morphodynamics*, Vol. 2: Talor and Francis, London, p. 665–674.
- Muto, T. and Swenson, J. B., 2006, Autogenic attainment of large-scale alluvial grade with steady sea level fall: An analog tank/flume experiment. *Geology*, **34**, 161–164.
- Muto, T., Steel, R. J. and Swenson, J. B., 2007, Autostratigraphy: a framework norm for genetic stratigraphy. *Jour. Sed. Res.*, **77**, 2–12.
- Neal, J. and Abreu, V., 2009, Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method. *Geology*, **37**, 779–782.
- 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*, Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., **18**, 55–68.
- Paola, C., Mullin, J., Ellis, C., Mohrig, D. C., Swenson, J. B., Parker, G., Hickson, T., Heller, P. L., Pratson, L., Syvitski, J. P. M., Sheets, B. and Strong, N., 2001, Experimental stratigraphy. *GSA Today*, **11**, 4–9.
- Paola, C., Straub, K., Mohrig, D. and Reinhardt, L., 2009, The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth Sci. Rev.*, **97**, 1–43.
- Parker, G., 1977, Basic principles of river hydraulics. *Jour. Hydraul. Division, ASCE*, **103**(HY9), 1077–1087.
- Parker, G. and Muto, T., 2003, 1D numerical model of delta response to rising sea level. *Proceedings of The 3rd IAHR symposium: river, coastal and estuarine morphodynamics*, 558–570.
- Parker, G., Muto, T., Akamatsu, Y., Dietrich, W. and Lauer, J. W., 2008a, Unraveling the conundrum of river response to rising sea level from laboratory to field. Part I. Laboratory experiments. *Sedimentology*, **55**, 1643–1655.
- Parker, G., Muto, T., Akamatsu, Y., Dietrich, W. and Lauer, J. W., 2008b, Unraveling the conundrum of river response to rising sea level from laboratory to field. Part II. The Fly-Strickland River System, Papua New Guinea. *Sedimentology*, **55**, 1657–1686.
- Petter, A. L. and Muto, T., 2008, Sustained alluvial aggradation and autogenic detachment from shoreline in response to steady fall of relative sea level. *Jour. Sed. Res.*, **78**, 98–111.
- Posamentier, H. W. and Allen, G. P., 1999, Siliciclastic Sequence Stratigraphy—Concepts and Applications. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, **7**, Tulsa, OK, 210p.
- 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*, SEPM Spec. Publ., **42**, 125–154.
- Posamentier, H. W., Jervy, 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*, SEPM Spec. Publ., **42**, 109–124.
- Sadler, P. M., 1981, Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Jour. Geol.*, **89**, 569–584.
- Schlager, W., 1993, Accommodation and supply—a dual control

- on stratigraphic sequences. *Sed. Geology*, **86**, 111–136.
- Schumm, S. A., 1977, *The Fluvial System*. John Wiley, Hoboken, N. J., 338p.
- Schumm, S. A., 1993, River response to base level change: implications for sequence stratigraphy. *Jour. Geol.*, **101**, 279–294.
- Shanley, K. W. and McCabe, P. J., 1994, Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **78**, 544–568.
- Sheets, B. A., Hickson, T. A. and Paola, C., 2002, Assembling the stratigraphic record: depositional patterns and time-scales in an experimental alluvial basin; Numerical and physical experimental stratigraphy. *Basin Res.*, **14**, 287–301.
- Sloss, L. L., 1962, Stratigraphic models in exploration. *Jour. Sed. Petrol.*, **32**, 415–422.
- Steel, R. J. and Olsen, T., 2002, Clinoforms, clinoform trajectories and deepwater sands. In Armentrout, J. M. and Rosen, N. C., eds., *Sequence stratigraphic models for exploration and production: Evolving methodology, emerging models and application histories*, Spec. Publ. GCS-SEPM, 367–381.
- Strahler, A. N., 1952, Dynamic basis of geomorphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **63**, 923–938.
- Swenson, J. B. and Muto, T., 2005, Controls on alluvial aggradation and degradation during steady fall of relative sea level: Theory. In Parker, G. and Garcia, M. H., eds., *River, coastal and estuarine morphodynamics*, Vol. 2, Talor and Francis, London, 675–684.
- Swenson, J. B. and Muto, T., 2007, Response of coastal-plain rivers to falling relative sea level: allogenic controls on the aggradational phase. *Sedimentology*, **54**, 207–221.
- Swenson, J. B., Voller, V. R., Paola, C., Parker, G. and Marr, J. G., 2000, Fluvio-deltaic sedimentation: A generalized Stefan problem. *European Jour. Appl. Math.*, **11**, 433–452.
- Swift, D. J. P. and Thorne, J. A., 1991, Sedimentation on continental margins, I: A general model for shelf sedimentation. In Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W. and Thorne, J. A., eds., *Shelf sand and sandstone bodies*, Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., **14**, 3–31.
- Swift, D. J. P., Stanley, D. J. and Curray, J. R., 1971, Relict sediments on continental shelves: a reconsideration. *Jour. Geology*, **79**, 322–346.
- Talling, P. J., 1998, How and where do incised valleys form if sea level remains above the shelf edge? *Geology*, **26**, 87–90.
- Thomas, M. A. and Anderson, J. B., 1994, Sea-level controls on the facies architecture of the Trinity/Sabine incised-valley system, Texas continental shelf. In Dalrymple, R. W., Boyd, R. and Zaitlin, B. A., eds., *Incised-valley systems: origin and sedimentary sequences*, SEPM Spec. Publ., **51**, 63–82.
- Thorne, J. A. and Swift, D. J. P., 1991a, Sedimentation on continental margins, II: application of the regime concept. In Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W. and Thorne, J. A., eds., *Shelf sand and sandstone bodies*, Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., **14**, 33–58.
- Thorne, J. A. and Swift, D. J. P., 1991b, Sedimentation on continental margins, VI: a regime model for depositional sequences, their component systems tracts, and bounding surfaces. In Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W. and Thorne, J. A., eds., *Shelf sand and sandstone bodies*, Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., **14**, 189–255.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., Jr. and Thompson, S., III, 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In Payton, C. E., ed., *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir **26**, 63–81.
- Van Andel, T. H. and Curray, J. R., 1960, Regional aspects of modern sedimentation in northern Gulf of Mexico and similar basins, and paleogeographic significance. In Shepard, F. P., Phleger, F. B. and Van Andel, T. H., eds., *Recent sediments, northwest Gulf of Mexico*, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Spec. Publ., **21**, 345–364.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M. and Rahmanian, V. D., 1990, Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. *Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, Methods in Exploration Series **7**, 55p.
- Weller, J. M., 1960, *Stratigraphic principles and practice*. Harper & Row, New York, 725p.
- Wescott, W. A., 1993, Geomorphic thresholds and complex response of fluvial systems—some implications for sequence stratigraphy. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **77**, 1208–1218.
- Woodford, A. D., 1951, Stream gradient and Monterey Sea valley. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **62**, 799–851.
- Wright, V. P. and Marriot, S. B., 1993, The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. *Sed. Geology*, **86**, 203–210.
- Yatsu, E., 1955, On the longitudinal profile of the graded river. *Eos Trans. AGU*, **36**, 655–663.
- Zaitlin, B. A., Dalrymple, R. W. and Boyd, R., 1994, The stratigraphic organization of incised-valley systems associated with relative sea-level change. In Dalrymple, R. W., Boyd, R. and Zaitlin, B. A., eds., *Incised-valley systems: origin and sedimentary sequences*, SEPM Spec. Publ., **51**, 45–60.

(要 旨)

武藤鉄司, 2011, 新しい平衡河川観:モデル実験が描く下流域沖積系の海水準応答. 地質雑, 117, 172–182. (Muto, T., 2011, A new view of fluvial grade revealed by model experiments: alluvial response in the lower reaches of rivers to sea level. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 117, 172–182.)

堆積物の輸送が行われているにも関わらず堆積も侵食も実質的に起こらない河川を平衡河川という。平衡河川は河川系における埋積レジムと削剥レジムの境界条件の具現に他ならず、その理解は成因論的層序学の基軸をなす。従来の平衡河川観は下流域沖積系における平衡河川の実現を静止海水準に対する河川系の平衡応答の結果と捉えるが、筆者らによる一連のモデル実験と理論的検討はそれとは異なる理解をもたらした。新しい平衡河川観は次のように要約される。固定境界を持たない下流域沖積系では、(1) 平衡河川は海水準が下降するときのみ実現可能であり、(2) 平衡河川の実現を許す海水準下降パターンは沖積勾配 α と海底基盤勾配 ϕ に依存し、(3) 平衡河川には $\alpha < \phi$ のもと非平衡応答で実現するアロジェニックなもの $\alpha = \phi$ のもと平衡応答で実現するオートジェニックなものがある。新しい平衡河川観を織り込んだ成因論的層序学の今後の展開が待たれる。