水槽実験による高い流れ領域での平坦ラミナの 形成について—予報—

八木下晃司* 芦 寿一郎**
二宮 悟** 平 朝彦***

A Preliminary Report on Experimental Plane Beds under Upper-Flow-Regime Conditions

Koji YAGISHITA*, Juichiro ASHI**, Satoru NINOMIYA**
and Asahiko TAIRA***

Abstract

Laboratory experiments aiming to produce plane beds under upper-flow-regime were carried out using a flume of 15 cm×700 cm and with quartz sands of mean size 0.72 mm. Two types of plane beds were formed: 1) laminae formed and buried by the migration of low-relief asymmetric ripples under near- or sub-critical flow (Froude Number $Fr=0.94$, Run-5), and 2) laminae formed without producing any low-relief bedform but under super-critical flow ($Fr=1.98$, Run-12). The mean flow velocity (83 cm/sec) and the mean depth (8 cm) in Run-5 are larger than those in Run-12 (62 cm/sec, 1 cm, respectively). Up-current imbrications of detrital grains, however, are more remarkable in Run-12 than in Run-5. Such a imbrication pattern may be useful to recognize the formational processes of plane beds under upper-flow-regime.

Key words: flume experiment, upper-flow-regime, plane bed, Froude Number, imbrication
キーワード: 水槽実験, 高い流れ領域, 平坦ラミナ, フルード数, インブリケーション

I. はじめに

水槽実験による粗粒砂を用いた平坦ラミナ (plane bed) の形成過程を論じてみたい。よく知られているように、平坦ラミナはいわゆる高い流れ領域 (upper-flow-regime) において形成される場合と、低い流れ領域 (lower-flow-regime)

で形成される場合の二つに分けられる (Simons *et al.*, 1965)。低い流れ領域におけるある流れの強さ (stream power) では、中粒砂を用いた場合平坦ラミナは形成されずリップル (ripple) が作られる。Simons *et al.* (1965) が表わした、流れの強さと粒径の関係における堆積構造の発生を示す分布図では、平均粒径が 0.7 mm より大き

* 岩手大学教育学部地学教室

** 東京大学大学院理学研究科地質学教室

*** 東京大学海洋研究所

* Department of Geology, Faculty of Education, Iwate University

** Institute of Geology, Graduate School of Science, University of Tokyo

*** Ocean Research Institute, University of Tokyo

い砂粒堆積物で平坦ラミナが作られる流力でも、これより小さい粒径では堆積構造としてはリップルが形成されるという。今回、我々は粗粒砂を用いていくつかの水槽実験 (Run) を試み、高い流れ領域における平坦ラミナの形成過程を研究した。そして顕微鏡下による粒子配列などの測定を行なった結果、非常に興味ある事実が判明したのでとりあえずその骨子を報告したい。

II. 実験および結果

水槽実験は東京大学海洋研究所に設置されている機械研究社 (株) 製の水槽を利用して行なった。この水槽は長さ 700 cm, 幅 15 cm, 深さ 50 cm の開水路で、あらかじめ砂粒堆積物を水路の上流に置き、これに適量の水を流して堆積構造を発生させるものである。流量は水槽タンクに備え付けられたバルブと、流れ込み口に近いところのバルブの計二つのバルブによって調節し、また流速は下流側に電動式ジャッキ (jack) を設置し、水槽を傾ける (最大傾斜 1/30) ことにより調節できる。また、さまざまな高さのアルミ板をいわゆる堰として設定し、下流端の流出口に差し込むことにより水深を調節した。

平坦ラミナの形成後は、水槽の流れ込み口を発泡スチロールで作った遮蔽板で一気に流水を遮断し、合わせて実験に用いたと同径の砂堆積物を流れ込み口にダンピングさせ、少量の流水をも完全に防ぐ方法を取った。このような実験手法は以前、我々が反砂堆を発生させた場合とほぼ同様である (八木下ほか, 1988; Yagishita and Taira, 1989)。使用した砂は日本原料 (株) から購入した粗粒砂を用い、またラミナの形成面を明瞭にさせるため、この粗粒砂に三陸久慈海岸 (岩手県) で採取した細粒砂鉄を混合した。粗粒砂の構成鉱物は石英が圧倒的に多く ($\sim 80\%$), ついで長石 ($\sim 10\%$), 堆積岩岩片 ($\sim 5\%$) などとなっている。細粒砂鉄を混合したため、水槽実験開始前の砂は平均粒径 (mean diameter) が $Me_\phi = 0.47$ (0.72 mm) となり、また淘汰度 (sorting) は $S_I = 0.74$ と中程度となった (表 1)。なお、流速は流速計を用いず、発泡スチロールの細片 (< 径 1 cm) を流し

表 1 水槽実験に使用した砂の粒度分析値 (顕微鏡下による粒径測定)。

Table 1 Granulometric data of sand for flume experiments.

Md_ϕ	Me_ϕ	S_I	S_{KI}	K_G
0.31	0.47	0.74	0.46	1.17

Md_ϕ : 中央粒径, Me_ϕ : 平均粒径, S_I : 淘汰度, S_{KI} : 歪度, K_G : 尖度

The data were obtained under the microscope, counting more than 200 grains per thin section. All data are in Φ scale. Md_ϕ : median diameter, Me_ϕ : mean diameter, S_I : sorting, S_{KI} : skewness, K_G : kurtosis.

表面流速を計った。この方法は野外における反砂堆の観測 (Yagishita, 1995) でも用いたもので、水深が数 cm 以下と極端に浅い場合に適している。

作られた平坦ラミナは水槽中に残っている水抜きを行なった後、自然乾燥させ合成樹脂を用いて固化させた。そして粒子配列測定のため十数枚の薄片を作成した。なお、いずれのサンプルも表層部の砂堆積物を取り除くため、表面より深さ 2~3 mm のところでカッティングを行なった。これは早い流れを急激に止めたとしても、なお減衰した少量の水の流れにより表層部の砂粒子のファブリックは多少の影響を受けると考えられるからである。同様に水槽のガラスの側壁と水流の摩擦の影響を除去するため、取り出した砂堆積物の外側より 5~10 mm 内側のところでカッティングを行なった。

前述したように一連の水槽実験 (Run-1 から Run-15 まで) では、二つのバルブによる水量の調節、ジャッキの操作により水槽全体を傾けて流速を調節し、そしてアルミ板を堰として水深の調節を行なったが、実験に使用した砂は常に同一のものを繰り返し用いた。このような実験で、例えば Run-3 では、水槽の傾きを大きくし (勾配, 0.0195) 流速を速めることにより (124 cm/sec.), 反砂堆を形成した。また Run-4 では、水槽を水平にして流速を遅くし (66 cm/sec.) バルブを絞って水量を減じた結果、移動砂の先端には典型的なマイクロデルタ (microdelta) を形成した。

図 1 実験後、水槽から取り出したサンプル (Run-5). 直線状の起伏 (2-D) を示すリップル頂部に注意. サンプル全長は 40 cm. 流れは左→右.

Fig. 1 Dewatered flume sample after Run-5. Note the straight-crested (2-D) low-relief bedform. The sample is 40 cm long, and current was from left to right.

さて、これら一連の実験において、以下に述べるように高い流れ領域における二つの Run (Run-5 および Run-12) で、形成過程の異なる二つのタイプの平坦ラミナを観測した。

Run-5: まず Run-5 による水槽実験の状況を述べる。Run-5 の堆積構造は初め、平均流速 $U=56$ cm/sec., 水深 $h=9$ cm, フルード数 (Froude Number) $Fr=0.24$, 水温 24.8°C のもとで半波長 38 cm 程度の非対称のリップルを形成した (ここでフルード数は $Fr=U/(gh)^{1/2}$ で与えられる。g は重力加速度)。その後、平坦ラミナは $U=83$ cm/sec., $h=8$ cm, $Fr=0.94$ のもとで平衡状態に達した後に形成された。実験後、ビデオカメラなどで詳細にみると、この平坦面の先端では高さ 1 cm 弱の高まりが次第に前面に押し出されていく状況が観察され (前進速度は $0.9\sim 1.1$ cm/sec.), 極めて小規模な一種の雪崩現象により、細粒砂鉄砂を含む平坦ラミナを被っていく様子がわかった (図 1)。この高まりはやはり非対称のリップルで、低速度 $U=56$ cm/sec. の時のリップルが変化したものとも言えるが、その半波長は約 80 cm と低速度時の倍以上の長さになっている。またリップルのいわゆるクレスト (頂部) は、流向に対して直行するタイプ (2-D) である (図 1, 図 2-A および図 3)。なお、堆積構造に言及する際、このクレストのように直線的なものを一般的に 2-D (two-dimensional), また曲線を示すものを 3-D (three-dimensional) という (例えば, Shaw and Keller-

図 2 A) 合成樹脂で固化したサンプルを流路に沿ってカッティングした断面 (Run-5).

太白矢印の部分は低い起伏状のリップル頂部を示し、またその下位にある中抜き太矢印が指す薄い黒線はラミナ面を示す。流れは左→右 (水平方向の矢印)。ペンの長さは 11 cm.

B) 同じく固化したサンプルの流路に沿った断面 (Run-12).

中抜き太矢印が指す薄い黒線はラミナ面。流れは右→左 (水平方向の矢印)。なお Run-12 では、低い起伏のリップルは形成されなかった。

Fig. 2 A) Solidified flume sample (Run-5) that shows a low-relief bedform of ripple (white arrow) associated with a covered lamina (open arrow). Thin arrow suggests the flow direction. The pencil is 11 cm long.

B) Solidified flume sample (Run-12) displaying a thin lamina (open arrow). Two thin arrows show the flow direction.

hals, 1977 ; Rust and Gibling, 1990)。このような平坦ラミナの形成過程は、かつて McBride *et al.* (1975) が記載したもの、また近年 Best and Bridge (1992) が報告したものとほぼ同じものと思われる。そして平坦面の先端の小さな高まりと水面との関係は、いわゆる非調和的 (out-of-phase) である、さらに極小規模な雪崩現象

図3 サンプル (Run-5) の流路に沿った断面 (Z-Y 面) と水平面 (X-Y 面) における粒子配列。Z-Y 面の薄片中の粒子は高角度のインブリケーションを示さず、これは Run-12 (図4) と対照的である。X-Y 面 (No. 3) の粒子の卓越方向は流向と平行に近いことに注意。粒子配列のための総測定数と最大頻度 (%) は各セクション毎に示してある。

Fig. 3 Preferred orientation of long axes of grains in the vertical plane (Z-Y) along the flow direction and in the horizontal plane (X-Y) in Run-5.

Note that grains along the flow direction do not show high-angle upcurrent imbrication when compared with those in Run-12 (Fig. 4). Section No. 3 was made from the horizontal plane of a few millimeters below the sedimentary surface. Number shows the grains counted for the measurement, and the maximum percentage of imbrication is marked in each circular histogram. Section numbers denote that 1. R5UC1-L1, 2. R5UL2-C2, 3. R5ML2-H, 4. R5ML2-C2, and 5. R5DR2-W.

(rheologic front: Bridge and Best, 1988) が発生してもこれによって斜交層理などは形成されない。この実験では、上、中、下流と約 20 cm の間隔を置いて三つのサンプルを採取した (図3)。

Run-12: Run-12 は、Run-5 と以下のような点で著しく異なる。水温、9.7℃のもとで始められた実験は、常時比較的遅い流速、 $U=61.5\sim62.1$ cm/sec.のもとで形成された平坦ラミナである。しかし、水深 $h=1$ cm と極めて浅いため、フルード数は $Fr=1.96\sim1.98$ と Run-5 の 2 倍以上の値に達している。また同じく、水深が極めて浅いため Run-5 のような小規模な雪崩現象すら発生しなかった。この実験でも約 40 cm の間隔を置いて上流、下流の大きく二つに分けてサンプルを採取した (図4)。水抜きを行なったそれぞれのサンプルは、流向方向の長さ 30 cm に対して、比高 5 mm 程度の高まりを見せていた。

薄片観察によるインブリケーション：前述した

ように Run-5 と Run-12 において薄片用の小ブロックを作成したが、その試料のいわゆるナンバリング (numbering) の方法は、若干煩わしい記述となるが以下の通りである (図3, 図4)。まず Run-5 においては、上 (U)、中 (M)、下流 (D) と、流向方向に大きなサンプルを採取した。これをさらに水路幅方向に、右岸 (R)、中央 (C)、左岸 (L) と三区分し、試料の流向方向が 30~40 cm と長いため、U、M、D の三区分のそれぞれをさらに上流側 (1) と下流側 (2) に二区分した。したがって、例えば図3の作製薄片ナンバー1の R5UC1 は Run-5 の上流側 (U) で、水路の中央部分 (C)、かつこのサンプル (U) のさらに上流側 (1) ということになる。なお、中央部のブロックでも水路幅方向に幅があるため、その左岸側 (L) から薄片を作製したことを表わす意味で R5UC1-L1 とした。また薄片3の R5ML2-H の (H) はブロックの水平面から作製したという意

図 4 サンプル (Run-12) の流路に沿った断面 (Z-Y 面) と 20° 上流側に傾斜した面 (X-Y' 面) における粒子配列. Z-Y 面ではいずれの薄片中の粒子も高角度のインブリケーションを示す. また X-Y' 面における粒子配列の卓越方向は流向とほぼ平行であることに注意.

Fig. 4 Preferred orientation of long axes of grains in the vertical plane (Z-Y) along the flow direction and in the 20° up-current inclined plane (X-Y') in Run-12.

Note that most sections show typical up-current imbrications of high-angle dipping. Number shows the grains counted for the measurement, and the maximum percentage of imbrication is marked in each circular histogram. Section numbers denote that 1. R12UR1-C1, 2. R12UR2-C2, 3. R12UR2-INC, 4. R12DL1-C1, and 5. R12DC1-R1.

味であり、さらに薄片 5 の R5DR2-W の (W) は右岸ブロックの側壁面を意味する。Run-12 においても同様であるが、薄片 3 の R12UR2-INC は試料の上流側右岸の部分でさらにその下流側のブロックの傾斜した面 (INC) から薄片を作製したことを示す。

Run-5, および Run-12 の薄片の顕微鏡下の粒子配列の測定は、粒子の長軸：短軸が 2.0 以上の明らかな伸長性を示すものを選んで行なわれたが、各薄片については 150～200 個の粒子を測定した。流路に沿った断面 (Y-Z 面) では、表層部から 3 mm 以深、19 mm 以浅の部分のみを測定した。その結果、砂粒子の流路に沿った断面のインブリケーションは、Run-5 と Run-12 とで著しい違いを見せていることが判明した。すなわち、Run-5 (平均流速 $U=83$ cm/sec., 水深 $h=8$ cm, フルード数 $Fr=0.94$) では、上流側に傾くインブリケーションはそれほど顕著ではない (図 3)。むしろ水平面 (堆積面) に近い粒子配列を見せている部分もあ

る。一方、Run-12 ($U=61.5\sim62.1$ cm/sec., 水深 $h=1$ cm, フルード数 $Fr=1.96\sim1.98$) の方は、高角度のはっきりした砂粒子のインブリケーションを示す (図 4)。インブリケーションの顕著なものの薄片は、20～30° の傾斜角が最大頻度分布を示す。このような粒子配列の特徴は、薄片を作成するため固化した堆積試料を流路に沿ってカッティングしている段階で、肉眼鑑定でも容易に気が付いた事実である。

なお、上述したように流路に沿った断面とは別に、水平面 (X-Y 面, Run-5), あるいは水平面から 20° 上流側に傾斜した面 (X-Y' 面, Run-12) で切った薄片における粒子配列も測定した (図 3, 図 4)。これらの粒子配列は、流路に沿った面におけるものほど卓越した方向性を示さないが、ほぼ流向に沿っていることがわかる。少なくとも、流向に直交する粒子配列が卓越していないことは明白である。

表 2 水槽実験における諸データ.

Table 2 Summary of experimental conditions.

	slope S	temp. (°C)	depth (cm)	velocity (cm·sec ⁻¹)	Froude no. Fr	shear stress τ_0 (g·cm ⁻¹ sec ⁻²) ¹⁾	dimensionless shear stress θ ²⁾
Run 5	0.0078	24.8	8	83	0.94	29.59	0.25
Run 12	0.0078	9.7	1	62.1	1.98	6.74	0.06

¹⁾ 掃流力 (τ_0) は $\tau_0 = \rho gSA/P$ より計算. ここで, ρ : 水密度, g : 重力加速度, S : 水槽勾配, A : 水槽中の水断面積, P : 水断面の周の長さ.

²⁾ 無次元掃流力 (θ) は $\theta = \tau_0 / (\sigma - \rho)gD$ より計算. ここで, D : 実験砂の平均粒径, σ : 砂の密度 (ここでは石英で代表).

¹⁾ Shear stress is calculated from $\tau_0 = \rho gSA/P$, where ρ is the density of water (1.0), A the average of cross-sectional area of the flume, and P the wetted perimeter.

²⁾ Dimensionless shear stress is calculated from $\theta = \tau_0 / (\sigma - \rho)gD$, where D is the mean diameter of sediments (0.072 cm) and σ the density of sediments (quartz, 2.7).

III. 考 察

Run-5 と Run-12 に見られる砂粒子のインブリケーションの違いはどのようにして発生したのであろうか. 筆者は Run-5 と Run-12 のフルード数が大きく異なることを述べたが, もちろんこのフルード数の違いがインブリケーションの違いと直接関連するものとは考えていない. 何故ならフルード数と, 堆積面における摩擦力や掃流力などとは直接関係付けられないからである. 筆者がフルード数を挙げているのは, 一つの指標としているに過ぎない. 事実, 掃流力 (shear stress, τ_0) や, 無次元掃流力 (dimensionless shear stress, θ) は Run-5 のほうが Run-12 よりはるかに大きい (表 2).

そこで我々はインブリケーションの明瞭な違いが, 両実験における堆積過程の違いに起因すると考えた. Run-5 の方は, 前述したように堆積面の前進面において極めて小規模な雪崩現象が発生し, これが平坦面を被っていく事実がある. このことから Run-5 の水平面とほぼ平行な粒子配列, あるいは低角度の弱いインブリケーションは, 「雪崩斜面におけるインブリケーション」と解釈できよう. すなわち, 下流側に傾斜する雪崩斜面に対してほぼ水平な粒子配列は, 斜面自体を堆積基準面と考えれば水平な粒子配列はこの基準面に対してのインブリケーションを示していることになる. 一方, Run-12 においては, 粒子が浮遊

(suspension) の状態で運搬されている過程で, 粒子どうしの衝突により発生したインブリケーションがそのまま保持されながら堆積したと考えられよう. なお, 水平面 (X-Y 面, Run-5), あるいはインブリケーション面 (X-Y' 面, Run-12) における粒子の伸長方向の配列が流向とほぼ平行の方向性を示していることは, 両者とも浮遊状態での粒子間の衝突 (encounter) が頻繁に行なわれており, 少なくとも粒子の転動 (rolling) が主とした挙動でないことは確かであろう (Rees, 1968).

高い流れ領域における平坦ラミナの形成過程については, 近年多数の論文が発表されている (例えば, Bridge and Best, 1988; Arnott and Hand, 1989; Paola *et al.*, 1989). これらの論文は同一の現象を異なる表現で記しているため, 多少の混乱が生じている. しかし平坦ラミナは, 基本的には次の二つの堆積過程によって発生していると見做される (Best and Bridge, 1992). すなわち, 1) 小さな高まり (relief) が前進することによって形成されるとする見解 (例えば, Smith, 1971; McBride *et al.*, 1975; Best and Bridge, 1992), そして 2) 堆積面近くで一種の乱流 (turbulence) により形成されるとする説 (例えば, Bridge, 1978; Paola *et al.*, 1989; Cheel, 1989) である. Run-5 は明らかに前者であり, Run-12 は後者と見做される.

かつて McBride *et al.* (1975) は Smith (1971) の野外例を引きながら, 平坦ラミナの形成は水深

が浅いことが重要であると主張した。しかし乱流説を取る Paola *et al.* (1989) は Bouma シーケンスの平行ラミナ (b ユニット) を想起させながら, McBride らの主張に疑問を呈した。Paola *et al.* は高速流による 100 ミクロン単位の厚さの絶え間ない侵食・堆積が平坦ラミナの形成に重要であると説く。筆者は両者の平坦ラミナの形成過程は共に自然界で起こりうるし, また現実が起こっていると考ええる。ここで筆者が強調したいのは, このように高い流れ領域で二つのタイプの平坦ラミナの形成過程が議論されているにもかかわらず, その粒子配列, とくにインブリケーションについて比較検討した報告がほとんど見当たらないことである。筆者の知る限りにおいては, かつて Taira (1989) が Run-5 のタイプの平坦ラミナについて, 帯磁率から粒子配列を推定した報告があるのみであって, 二つのタイプにおけるインブリケーションの発達程度の違いを論じたのはこれが初めてである。

野外における高い流れ領域における平坦ラミナとインブリケーションの関係はどうかであろうか。タービダイトにおける平坦ラミナで上流側へ傾く粒子のインブリケーションは枚挙に暇がない (例えば, Taira and Scholle, 1979; Yagishita, 1994)。これらは明らかに Run-12 と同様なプロセスによる平坦ラミナの形成である。しかし, 顕著なインブリケーションはなく, ラミナと平行でさえある粒子配列, つまり Run-5 と同様なプロセスはどうであろうか。これについてはいくつかのフィールド例を現在検討中である。いずれにしても平坦ラミナの形成過程は二つのタイプがあり これらの識別は堆積粒子のインブリケーションの発達度が重要な鍵になるであろうと我々は考えている。

IV. 結 論

1) 水路実験による高い流れ領域の平坦ラミナの形成を試みた。平坦ラミナの形成は, リップルの前進およびこれによる平坦ラミナの形成・保存 (low-relief bedform migration) によるもの (Run-5) と, いわゆる乱流 (turbulence) により形成されるもの (Run-12) の二つのタイプによる

ことを確認した。

2) Run-5 と Run-12 の平坦ラミナの粒子配列を鏡下で検討した。その結果, 小リップルの前進に伴う平坦ラミナの形成 (Run-5) については, Run-12 に比較して水流が相対的に速いにもかかわらず, 堆積面に対する顕著なインブリケーションは認められなかった。一方, いわゆる乱流による平坦ラミナの形成 (Run-12) では, 堆積面に対して 堆積粒子の高角度のインブリケーションが発生することが判明した。

3) 以上の水槽実験, および粒子配列の検討結果から, 野外における平坦ラミナの形成過程, すなわち二つのタイプの平坦ラミナの区別は, 粒子配列の検討とりわけインブリケーションの発達程度が有効な判断基準となろう。

謝 辞

この小論をまとめるに当たっては, 岩手大学農学部農業水工学教室の三輪 弼教授には重要なご教示を頂いた。またこの小論については 1994 年秋以来, 筆者ら 4 名の共同研究として断続的に行なわれてきたが, 1994~1995 年の 2 年間は八木下が東京大学海洋研究所の共同利用研究としての経済的支援を受けた。また 1996 年には, 八木下・芦への文部省科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 課題番号: 08640565) の一部を使用して研究が行なわれている。ここに記して関係当局に深く感謝いたします。なお, 現在筆者は追実験と, より細粒な砂堆積物における平坦ラミナの形成についても研究を行なっており, これらの研究結果はいずれ別の機会に公表する予定である。

文 献

- Arnott, R.W.C. and Hand, B.M. (1989): Bedforms, primary structures and grain fabric in the presence of suspended sediment rain. *J. Sed. Petrol.*, **59**, 1062-1069.
- Best, J. and Bridge, J. (1992): The morphology and dynamics of low amplitude bedwaves upon upper stage plane beds and the preservation of planar laminae. *Sedimentology*, **39**, 737-752.
- Bridge, J.S. (1978): Origin of horizontal lamination under turbulent boundary layers. *Sedim. Geol.*, **20**, 1-16.
- Bridge, J.S. and Best, J.L. (1988): Flow, sediment transport and bedform dynamics over

- the transition from dunes to upper-stage plane beds: Implications for the formation of planar laminae. *Sedimentology*, **35**, 753-763.
- Cheel, R.J. (1990): Horizontal lamination and the sequence of bed phases and stratification under upper-flow-regime conditions. *Sedimentology*, **37**, 517-529.
- McBride, E.F., Shepherd, R.G. and Crawley, R.A. (1975): Origin of parallel, near-horizontal laminae by migration of bed forms in a small flume. *J. Sed. Petrol.*, **45**, 132-139.
- Paola, C., Wiele, S.M. and Reinhart, M.A. (1989): Upper-regime parallel lamination as the result of turbulent sediment transport and low-amplitude bed forms. *Sedimentology*, **36**, 47-59.
- Rees, A.I. (1968): The production of preferred orientation in a concentrated dispersion of elongated and flattened grains. *J. Geol.*, **76**, 457-465.
- Rust, B.R. and Gibling, M.R. (1990): Three-dimensional antidunes as HCS mimics in a fluvial sandstone: The Pennsylvanian South Bar Formation near Sydney, Nova Scotia. *J. Sed. Petrol.*, **60**, 540-548.
- Shaw, J. and Kellerhals, R. (1977): Paleo-hydraulic interpretation of antidune bedforms with applications to antidunes in gravel. *J. Sed. Petrol.*, **47**, 257-266.
- Simons, D.B., Richardson, E.V. and Nordin, Jr.C.F. (1965): Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. *SEPM Spec. Publ.*, **12**, 34-52.
- Smith, N.D. (1971): Pseudo-planar stratification produced by very low amplitude sand waves. *J. Sed. Petrol.*, **41**, 69-73.
- Taira, A. (1989): Magnetic fabrics and depositional processes. In Taira, A. and Masuda, F. eds.: *Sedimentary facies in the active plate margin*. Terra Scient. Publ., Tokyo, 43-77.
- Taira, A. and Scholle, P.A. (1979): Deposition of resedimented sandstone beds in the Pico Formation, Ventura Basin, California, as interpreted from magnetic fabric measurements. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **90**, 952-962.
- Yagishita, K. (1994): Antidunes and traction-carpet deposits in deep-water channel sandstones, Cretaceous, British Columbia, Canada. *J. Sed. Res.*, **A64**, 34-41.
- Yagishita, K. (1995): Antidunes in a small gorge on the beach sand, the Sanriku Coast, northeast Japan. *J. Sed. Soc. Japan*, **42**, 21-28.
- Yagishita, K. and Taira, A. (1989): Grain fabric of a laboratory antidune. *Sedimentology*, **36**, 1001-1005.
- 八木下晃司・中里裕臣・五十嵐千秋・平 朝彦 (1988): 水槽実験により作られた反砂堆の粒子配列について. *地質学雑誌*, **94**, 55-57.

(1996年12月10日受付, 1997年2月24日受理)