

流れタイプと粒子配列の関係についての 実験的研究

An Experimental Study on the Relationship between Grain Fabric and Flow Types

横川 美和*・増田富士雄**

Miwa YOKOKAWA and Fujio MASUDA

I はじめに

砂質堆積物の粒子配列については、砂床表面での粒子の配列、すなわちオリエンテーションの研究が多く行われている。特に一方向流の堆積物については多くの実験があり、粒子の長軸が流れと平行になるように堆積する場合が多く(例えば, Dapples and Rominger, 1945 ; Schwarzacher, 1951), 流れの条件によっては斜交するものや直交するものがあることが知られている(八木下, 1988)。振動流の堆積物のオリエンテーションについては、リップルあるいは前浜面での研究がいくつかあり(例えば, Curray, 1956 ; Seibold, 1963 ; Taira, 1989), 波の峰と平行な長軸をもつ粒子が多いとされている。

一方、流れに平行する鉛直断面での砂質堆積物の粒子配列については、一方向流のプレーンベッドでインプリケーションがみられることがよく知られており(例えば, Schwarzacher, 1951 ; Parkash and Middleton, 1970), その角度の分布が堆積量と関係することなどが指摘されている(Arnott and Hand, 1989)。しかしほかのベッドフォームについては、アンティデューン(八木下ほか, 1988)や巨大砂漣(Pickering and Hiscott, 1985), 振動流でのウェーブメガリップル(牧野・増田, 1986), 前浜面(Shelton and Mack, 1970 ; 横川・増田, 1988a ; Taira, 1989)

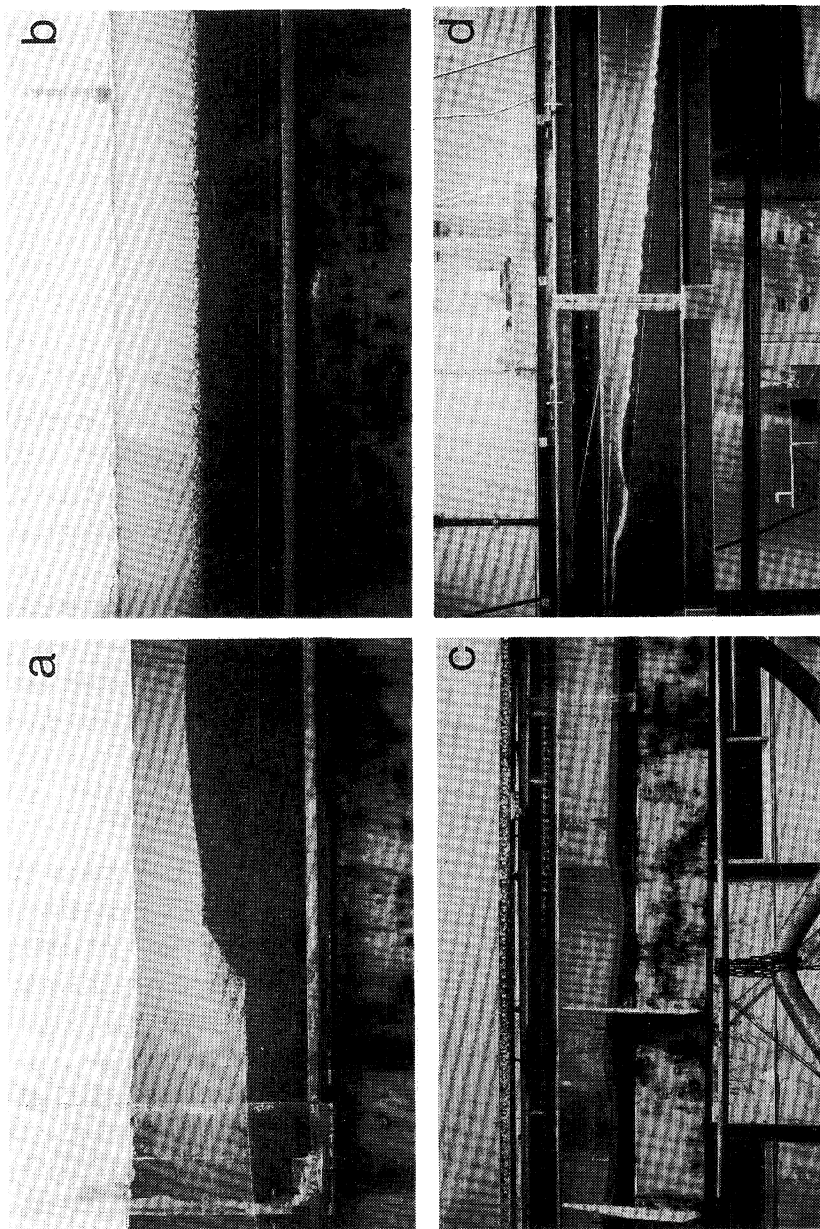
や、ハンモック状斜交層理(八木下・平, 1989 ; 横川・増田, 1989 ; Cheel, 1990, in press)についての、記載的な報告があるにすぎず、これらを統一的な視点から論じたものはない。また、ウェーブリップルの鉛直面での粒子配列についてはほとんど研究されていない。

ここでは循環水路と造波水槽で作った様々なベッドフォームについて、流れに平行な鉛直断面での粒子配列を調べた。そして、一方向流と振動流という最も基本的な流れのタイプによって粒子配列が異なることを明らかにする。

II 方法

一方向流の実験は小型循環水路(長さ16m, 幅0.3m, 高さ0.4m)で行った。砂は中粒の川砂で、内部のラミナの様子がよくわかるように淘汰度の悪い砂を使った。砂床のベッドフォームが安定してでき続けるまで、およそ2時間ほど同じ状態で砂と水を循環させながら流し続けた(第1図a, b, c)。そして、水槽の内側の幅とほぼ同じ幅で内壁とぴったり接触するような板を上流端と下流端で二枚同時にすばやく差しこみ瞬間的に水を止めた。このようにしてベッドフォームを保存できる。その後下流端で板の底をわずかに上げ、プールされた水に流れが生じないように少量ずつ水を抜いた。なお、プレーンベ

*筑波大学・院・地球科学研究科 **筑波大学地球科学系



第1図 a：水理実験センターの小型循環水路でカレントリップルが前進している様子。右が上流側。リップルの高さは約2 cm。b：同水路でアレーンベッドが形成されている様子。右が上流側。水深は約3 cm。c：同水路でアンティディューンが形成されている様子。左が上流側。水路の深さは40 cm。d：造波水槽で形成されたバームバーシステム。バーの“沖”側にはウェーブリップルが形成されている。水槽の高さは40 cm。

ッドとアンティデューンの場合は、明らかに堆積したことがわかる部分を作るために、ベッドフォームができ始めたところをみはからってあらかじめ取っておいた砂（バケツ三杯程度）を静かに上流端から入れ、砂床面を0.5～1.5cmほど上昇させて、それ以前のベッドフォームを壊すことなく保存した。

振動流の実験は、造波水槽（長さ12m、幅0.2m、高さ0.4m）で行った。砂は平均粒径0.2mmの標準砂を使った。初めに砂を1/10勾配のスロープに様に敷きつめ、これに周期1.18秒、波高7cmの波を2分間あてた。その結果、バームとバー、およびウェーブリップルが形成された（第1図d）。造波機を止めると同時に沖側端に板を差しこんで急激に波を止め、余波の影響でベッドフォームが変形するのを防いだ。一方向流の時と同様に、流れが生じない程度の速さで徐々に水を抜いた。

こうして作ったベッドフォームから、横川・増田（1988b）の方法に従って解析用のサンプルを採った。すなわち、縦10cm、横15cm程度のプラスチックの枠とアルミ板を用いて、砂のブロックを静かに取り出した。そのまま一晩乾燥させ、その中央部をおよそ3cm角にナイフで切出し、アルファシアノアクリレート瞬間接着剤（商品名：アロンアルファ）を浸透させて粒子を固定した。これにさらにエポキシ系樹脂（商品名：ペトロポキシ154）を浸透させると、定方位の研磨片を作ることができる。

粒子配列の解析にあたっては、流れの方向に平行な断面の反射顕微鏡写真で、粒子の長軸の傾く角度を測った。測った部位はベッドフォーム表面よりおよそ3mm下の高さ約1mm、横幅1.2～1.5cmの部分で、一つのサンプルについて200～600個の粒子を測定した。測定は長軸と短軸の比が1.5以上の粒子について行った。

解析したサンプル数は、一つのベッドフォームについてそれぞれ2～4個である。それぞれの解析結果について、粒子の長軸の水平面のなす角度を20度ごとのグループにわけ、その頻度をサーキュラーダイアグラムで表した。それぞれについて、Mardia（1972）の方法に従って求めた粒子配列の平均方向とその分散度を示した。

III 結 果

1) 一方向流

実験に用いた小型循環水路では、一方向流の流速が大きくなるに従ってカレントリップル、プレーンベッド、アンティデューンが形成された。デューンについては典型的なものを形成することができなかったため、増田・須崎（1984）の結果を併記する。

a. プレーンベッド

プレーンベッドの粒子配列は、一方向に傾く粒子が卓越する（第2図b）。これは上流側へインブリケーションした粒子が非常に多いことを示している。平均方向として表されているインブリケーションの角度は平均20度で、その分散度は0.17—0.23と比較的低い値を示し、分布のばらつきが少ないことがわかる。

b. アンティデューン

アンティデューンの粒子配列は上流側へのインブリケーションが卓越しており、プレーンベッドとよく似ている（第2図b）。インブリケーションの角度はそれよりやや急で、分布する範囲も広い。このため分散度はプレーンベッドに比べて高い（0.26—0.35）。

c. カレントリップル

カレントリップルの平坦なトップセット部の粒子配列は、プレーンベッドとよく似ている（第2図b）。フォーセット部の粒子配列は独特のパターンを持っている。すなわち、ラミナとほぼ平行か、それより緩い角度で下流側に傾く粒子と、水平面にほぼ平行な粒子が多くみられる（第2図b）。

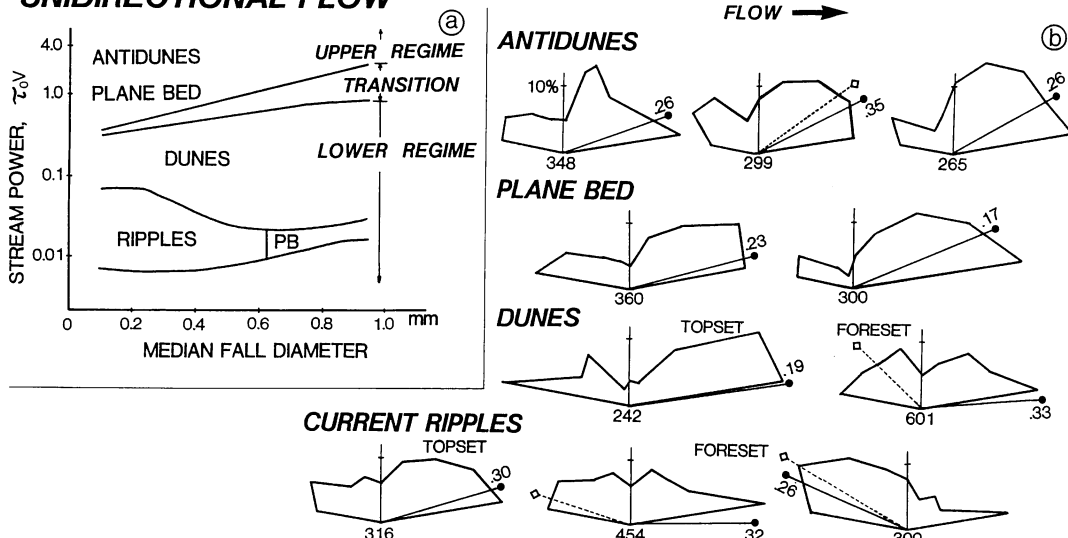
d. デューン

水理実験センターの大型水路で形成されたデューン（増田・須崎，1984）は、カレントリップルとよく似た粒子配列を示す。すなわち、トップセット部ではプレーンベッドと似た上流側へのインブリケーションが発達し、フォーセット部ではラミナとほぼ平行か、それより緩い角度で下流側に傾く粒子と、水平面にほぼ平行な粒子が多くみられる（第2図b）。

2) 振動流

振動流では、始めにリップルが形成される。そのリップルのサイズは粒径によって変化する。細粒砂

UNIDIRECTIONAL FLOW



第2図 a：一方向流で形成される様々なベッドフォームの、堆積物の粒径および流れの強さとの関係 (Reineck and Singh, 1986 より)。b：一方向流のベッドフォームの粒子配列。黒丸のついた実線は粒子の傾きの平均方向、数字はその分散度。四角のついた破線はラミナの傾き。水平なラミナは示されていない。それぞれのサーキュラーダイアグラムの下に数字は、測定した粒子の数を表す。デューンのデータは増田・須崎 (1984) による。アンティデューンとプレーンベッドでは、上流側へのインプリケーションがよく発達している。デューンおよびカレントリップルでは、トップセットはプレーンベッドと似た粒子配列を示す。フォーセットの粒子配列はラミナ面を水平まで回転させてみると、水平なものと上流側にインプリケーションしているものからなることがわかる (本文参照)。

で流速が大きくなるとハンモック状斜交層理を示すベッドフォームが形成され、さらに流速が速くなるとプレーンベッドが形成される (Harms *et al.*, 1982; Reineck and Singh, 1986; 第3図a)。

a. プレーンベッド

今回使った造波水槽は流速があまり大きくならないので、プレーンベッドについては波によって作られた頂きが平らなバーのトップセットの平行集理部を用いた。この部分は砂粒子が波によって岸沖方向に行ったり来たりしながら堆積したところである。

このプレーンベッドの粒子配列にみられる特徴は、岸・沖両方向に低角度で傾いた粒子、および水平面にほぼ平行に堆積した粒子が卓越することである。サーキュラーダイアグラムの形が一方向流のものに比べて偏平なのは、低角度の分布が多いためである。サンプルによっては高角度で傾く粒子が多くみられ

る場合もある (第3図b)。

b. ウェーブリップル

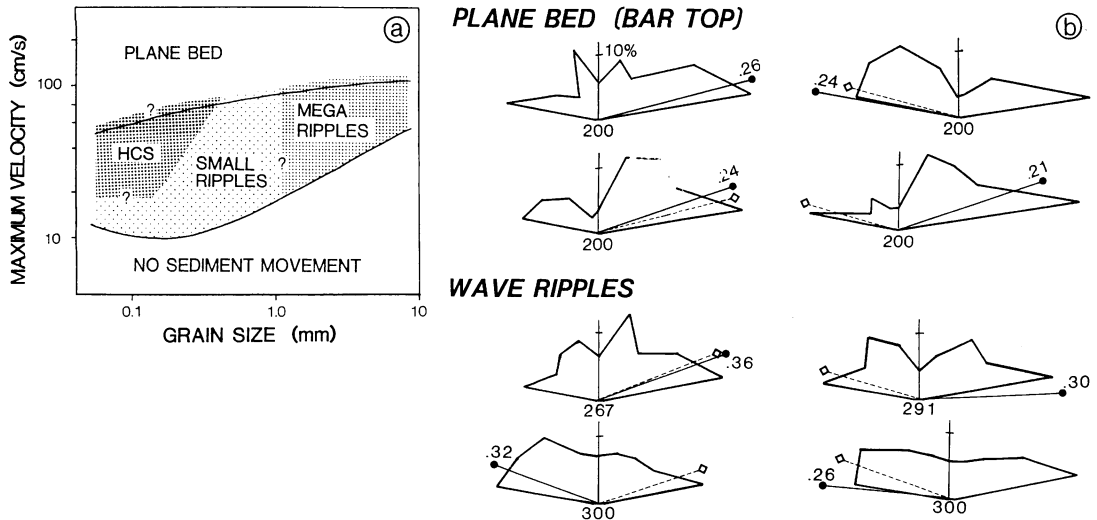
ウェーブリップルの峰の両側で粒子配列を解析した。その特徴はプレーンベッドの場合と同様に、岸・沖両方向に低角度で傾いた粒子と、水平面に平行に近い粒子が卓越することである。プレーンベッドに比べて高角度で傾く粒子の頻度が増えるので、平均方向の分散度は高い (第3図b)。

IV 考察

1) 一方向流のベッドフォームの粒子配列

一方向流で作られたベッドフォームの粒子配列は、一方向に傾いた、上流側へのインプリケーションを示す粒子が非常に卓越することが特徴であることがわかった。これは特に、アンティデューンとプレーンベッドの粒子配列に顕著にみられる。一方、デュ

OSCILLATORY FLOW

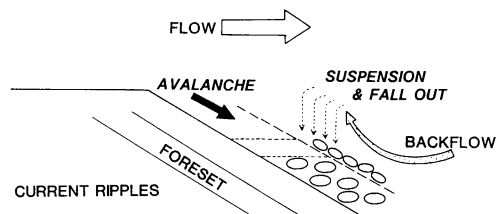


第3図 a：振動流で形成される様々なベッドフォームの、堆積物の粒径および底面付近の流れの強さとの関係 (Harms *et al.*, 1982 ; Reineck and Singh, 1986 より作製)。b：振動流のベッドフォームの粒子配列。凡例は第2図に同じ。どの場合も卓越方向が低角で両方向に分布している。

ーンおよびカレントリップルのフォーセットの粒子配列は、プレーンベッドなどとは異なった特徴的な分布を示す。それはラミナ面に平行に長軸を向けた方向と、水平面にほぼ平行あるいは、低角度で上流側へ傾いた卓越方向が現れる分布である。

この二峰性分布は、実験観察から二つの堆積作用の結果であることがわかった。すなわち、カレントリップルのトップセットを転動してきた砂粒子のうち比較的大きな粒子はすべり面をなだれ落ち、長軸を水平にして堆積する。これに対して、比較的小な粒子はバックフローで巻き上げられた後、バックフローの減速により落下し(あるいは吹き寄せられ)て、すべり面にはりつくようにして堆積する(第4図)。その上にまた、次になだれ落ちてきた粒子が堆積する、ということが繰り返される。このようにしてできた分布は、一見プレーンベッドやアンティデューンと異なっているが、サーキュラーダイアグラムを回転させてラミナ面を水平にしてみると、上流側へ傾く粒子が卓越した同様の配列と考えることができる。以上のことから、一方向流によって作られ

たベッドフォームの粒子配列は、すべて上流側へのインプリケーションが卓越した分布をとることがわかる。



第4図 カレントリップルが前進する時のリップル前面での粒子の動き。リップル頂部を転動してきてすべり面上部で放出された砂粒子の内、比較的大きな粒子はすべり面をなだれ落ちて長軸を水平にして堆積し、小さな粒子は浮遊した後バックフローによって巻き上げられ、落下してすべり面にはりつくようにして堆積するものが多い(本文参照)。

2) 振動流のベッドフォームの粒子配列

これに対して、振動流によって作られたベッドフォームの粒子配列は岸・沖両方向に傾く配列を示す。これは、振動流の二つの向きの流れそれぞれに対して最も抵抗が少ないように堆積した結果と考えられよう。ウェーブリップルのフォーセットのようにラミナ面が傾いている場合でも、ラミナ面に対してスロープの上側へ向って傾く方向と、下側へ傾く（ラミナ面より急な角度で傾いている）卓越方向がみられる。後者は上で述べたような一方向流によるプロセスでは作り得ない。スロープをはいあがる流れに抵抗が少ないように配列したもので、振動流特有の粒子配列と考えられる。

3) 流れタイプと粒子配列

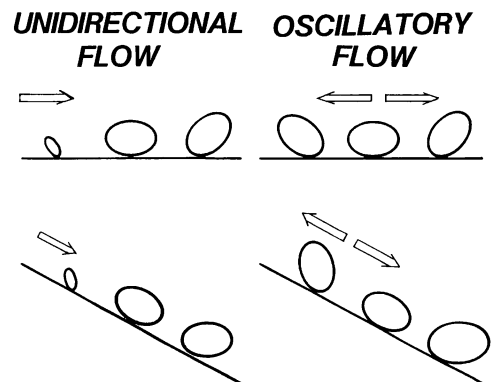
以上のように、粒子配列は一方向流と振動流とでそれぞれ固有の配列様式を持っている。この結論は、今回初めて明らかにされたものである。この流れタイプによる区分によって、今までに報告されているさまざまなベッドフォームの粒子配列の結果をも統一的に理解することができる。すなわち、一方向流のプレーンベッドでの一方向へ傾く配列、つまり上流側へのインプリケーションについては、前に述べたようによく知られている（例えば、Schwarzacher, 1951 ; Parkash and Middleton, 1970 ; Arnott and Hand, 1989）。また大型水路で形成されたデューンのトップセットの平行葉理の部分（増田・須崎, 1984 ; 第2図b）や、アンティデューンの実験結果（八木下ほか, 1988）でも、同様の一方向に傾く粒子配列を示している。巨大砂漣の粒子配列（Pickering and Hiscott, 1985）やデューンのフォーセット部（増田・須崎, 1984 ; 第2図b）は、今回のカレントリップルと同じ二峰性の粒子配列を示している。また、振動流では現世の前浜面のプレーンベッドの粒子配列（横川・増田, 1988a）が両方向への傾きを示しているほか、ウェーブメガリップルの粒子配列（牧野・増田, 1986）は今回のウェーブリップルの結果と同じ傾向を示している。さらにストームによる振動流で作られたと考えられるハンモック状斜交層理の粒子配列（八木下・平, 1989 ; 横川・増田, 1989 ; Yokokawa, 1990 ; Cheel, 1990, in press）について

も同様に、両方向に傾く粒子配列がみられる。

このように砂質堆積物の鉛直断面での粒子配列は、粒子の傾く角度やその頻度に違いはあっても、それを作った流れのタイプに対応して二つのパターンのどちらかになる。ベッドフォームは一方向流においても振動流においても流速と粒径に応じてさまざまに変化するが、粒子配列は流れのタイプという簡単な基準で二つに分けることができる。別の見方をすれば、粒子は堆積したその場所での流れに最も抵抗が少ないように並んでいるにすぎない。つまり、一方向流では一方向に、振動流では相反する二方向にインプリケーションしているといえる（第5図）。

V まとめ

循環式水路で一方向流によって形成されたベッドフォームと、造波水槽で振動流によって形成されたベッドフォームの粒子配列を解析した。その結果、一方向流のベッドフォームの粒子配列は、一方向に傾く、上流側へのインプリケーションを示すものであること、これに対して振動流のベッドフォームの



第5図 流れタイプに対応した、粒子配列の二つのタイプのモデル図。実線はラミナ面、矢印は流れの方向、楕円は粒子を示す。楕円の大きさはそれぞれが代表する卓越方向のおよその頻度を示している。斜面（ラミナ面）の角度、流れの強さ、粒径およびベッドフォームの違いにかかわらず、一方向流では一方向に卓越方向を持つ粒子配列、振動流では両方向に卓越方向を持つ粒子配列が発達する。

粒子配列は、岸・沖両方向に傾く配列を示すという二つのパターンがあることがわかった。この二つの粒子配列のパターンは流速および粒径に関わりなく、一方向流か振動流かという流れのタイプに支配されているといえる。この結論によって、これまでに報告されている流れに平行な鉛直断面での粒子配列の例をも同じように解釈することができる。流れのタイプというごく基本的な区分によって、粒子の配列様式を統一的にみることができたといえよう。

謝 辞

小型循環水路の実験については筑波大学地球科学系の伊勢屋ふじこ博士に、また造波水槽の実験については同砂村継夫教授に、終始ご教示・ご助力をいただいた。同水理実験センターの皆様および同地球科学研究科の村越直美さんには実験をお手伝いいただいた。以上の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 牧野泰彦・増田富士雄 (1986) : 霞ヶ浦北東岸の成田層に見られるウェーブデューン。茨城大学教育学部紀要 (自然科学), No. 35, 73—84.
- 増田富士雄・須崎和俊 (1984) : 未固結砂の定方位薄片作製とその堆積学的意義。筑波大学水理実験センター報告。No. 8, 17—28.
- 八木下晃司 (1988) : 堆積粒子の配列について。地学雑誌, 97, 697—709.
- 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.
- 八木下晃司・平 朝彦 (1989) : ハンモッキー斜交層理の粒子配列。日本地質学会第96年学術大会講演要旨, 324.
- 横川美和・増田富士雄 (1988a) : 前浜堆積物の粒子配列—茨城県鹿島郡荒野海岸での観察例—。月刊地球, 10, 452—457.
- 横川美和・増田富士雄 (1988b) : 現世海浜堆積物の粒子配列解析用試料の作製法。筑波大学水理実験センター報告, No. 12, 31—35.
- 横川美和・増田富士雄 (1989) : ハンモック状斜交層理の粒子配列。日本地質学会第96年学術大会講演要旨, 323.

- Arnott, R. W. C. and Hand, B. M. (1989) : Bedforms, primary structures and grain fabric in the presence of suspended sediment rain. *Jour. Sediment. Petrol.*, 59, 1062—1069.
- Cheel, R. J. : Grain fabric in hummocky cross-stratified storm beds : genetic implications. in press.
- Curry, J. R. (1956) : Dimensional grain orientation studies of recent coastal sands. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 40, 2440—2456.
- Dapples, E. C., and Rominger, J. F. (1945) : Orientation analysis of fine-grained clastic sediments : A report of progress. *Jour. Geol.*, 53, 246—261.
- Harms, J. C., Southard, J. B., and Walker, R. G. (1982) : *Structure and Sequences in Clastic Rocks*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Short Course, No. 9, SEPM, Tulsa, 8—51p.
- Mardia, K. V. (1972) : *Statistics of Directional Data*. Academic press, London, 18—38.
- Parkash, B. and Middleton, G. V. (1970) : Down current textural change in Ordovician turbidite greywacke. *Sedimentology*, 14, 259—293.
- Pickering, K. T. and Hiscott, R. N. (1985) : Contained (reflected) turbidity currents from the Middle Ordovician Cloridorme Formation, Quebec, Canada : an alternative to the antidune hypothesis. *Sedimentology*, 32, 373—394.
- Reineck, H.-E. and Singh, I. B. (1986) : *Depositional Sedimentary Environments*. 2ed., Springer-Verlag, Berlin, 551p.
- Schwarzacher, W. (1951) : Grain orientation in sands and sandstones. *Jour. Sediment. Petrol.*, 21, 162—172.
- Seibold, E. (1963) : Geological investigation of near-shore sand transport. Sears, M., ed., *Progress in Oceanography*. 1, Pergamon, Oxford, 1—70.
- Shelton, H. E. and Mack, D. E. (1970) : Grain orientation in determination of paleocurrents and sandstone trends. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 54, 1108—1119.
- Taira, A. (1989) : Magnetic fabrics and depositional processes. Taira, A. and Masuda, F. eds. : *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, Terra Scientific Publ. Comp. Tokyo, 43—77.

Yokokawa, M. (1990) : Grain fabric of hummocky
cross-stratification : relation to the flow types.

Master thesis of Tsukuba University, 52p.