

砂堆模型まわりの流れと圧力分布

On Flow and Pressure Distribution around Solid Dune Models

名古屋大学 正員 中川武夫

1. はじめに

河床波の形態は対象とする流れのフルード数が増すにつれて、砂漣、砂堆、遷移可床、平坦河床そして反砂堆と順次変化することが知られている。しかしながら、1つの河床波がそのまわりの流れとどのような干涉機構を通して他の河床波へと変形していくのかは明らかではない。これに関連して前世紀末に Darwin¹⁾は、河床波の頂部付近ではく離れた流れとそれに伴ってできるはく離渦 (Separation Eddy) が河床波の変形に重要な役割を演じることを指摘している。Fig. 1 は Darwin が砂堆まわりの流れをインクで可視化した際の観察をもとにして描いた砂堆まわりの流線の予想

図である。前の砂堆頂部のわずか後方の位置ではく離れた流れは後続する砂堆前部のゆるい傾斜面に再付着し砂堆谷部にはく離渦を形成する。したがって、こうした砂堆まわりの流れがはく離するとはく離点 (Separation point) と再付着点 (Reattachment point) を結ぶ自由流線 (Dividing free streamline) より上方の流体は下流へ流れ去るが、一方はく離渦内では再循環流ができるのではなく離渦の下部の流れは主流とは逆方向となる。換言すれば連続する砂堆の表面に沿う流れの一部は下流へ、一部は上流へ向うことになる。

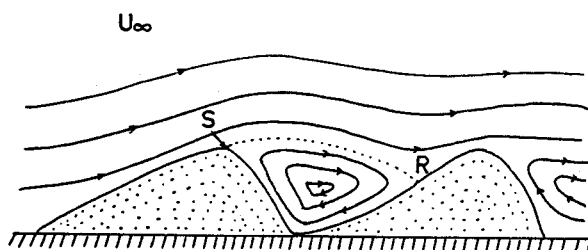


Fig.1 Streamlines around the dunes when the flow separates.
(after Darwin¹⁾)

Raudikivi²⁾ は河床の土砂は下流へのみ掃流されるばかりでなく、一部は上流へも運ばれることを明らかにしているが、それは Fig.1 から明らかであろう。Raudikivi と同様 Williams & Kemp³⁾、Etheridge & Kemp⁴⁾ らもまた河床形態の変形に対する流れのはく離の重要性を認め、流れと移動床との干涉機構を明らかにしようと試みている。

こうした一連の試みの多くははく離を伴う河床波のまわりの流れが河床に垂直に立てた単一のステップ状の板のまわりの流れと相似であるという前提に立っている。しかしながら、このような前提では連続する河床波に本質的な特性、すなわち前方の河床波まわりの流れに対するその後方の河床波の効果を明らかにすることはできない。こうした立場に立って、本研究では連続する2つの頂部をもった12種類の砂堆模型まわりの流れの可視化実験と、2種類の砂堆模型まわりの圧力分布の測定を行ない河床上の砂堆と流れとの干涉によって起こる土砂の浸食、運搬および堆積の機構について考察を加える。

2. 実 験

2.1 流れの可視化実験装置

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。水槽は長さ 14.64 m、幅 61.6 cm、そして深さ 35.0 cm である。水槽底面に沿って砂堆模型を走らせ、砂堆模型周辺の流れの状況を模型といっしょに動くカメラで撮影した。本実験では Table 1 に掲げた諸元の12種類の砂堆模型を使用した。これらの模型は連続する2つの同じ山形から成る二次元断面を有していることが特徴である。なお、Table 1 内で名づけたそれぞれの砂堆模型の断面形状は Fig. 3 に示したとおりである。

2.2 流れの可視化法

砂堆模型まわりの流れを可視化するためのトレーサーとしてはミルクと水素気泡の2種類を使った。前者は模型表面近くの流れを、後者は模型まわりの全体的な流れの可視化に用いた。ミルクにより流れを可視化する場合には静止している模型の谷部に少量のミルクを注射器を使って注入したのち、模型の速度を所要の速度に設定するという方法を用いた。一方、水素気泡による流れの可視化の場合には水素気泡発生装置の陰極としてFig.2に示すように水槽側壁から15.5cmの位置に流れ方向に砂堆模型の表面に沿うように取りつけた細い銅線(直径0.082mm)から発生する水素気泡によって、実験で行なった流れの観察及び写真撮影はすべて、砂堆模型の速度を設定したのち、十分長い時間がたってからの流れを対象としているので、一様流中での砂堆模型まわりの流れをほぼ実現しているものと考えて良いだろう。流れの状況の写真の解析に際してミルクと水素気泡に作用する浮力の効果についてはとくに評価していないが、ここでの定性的可視化実験ではこれを問題とする必要はない。または離渦内の流れが安定(層流)状態であるか、不安定(乱流)状態であるかについては、発生する水素気泡の拡散、混合の状態 で判別した。

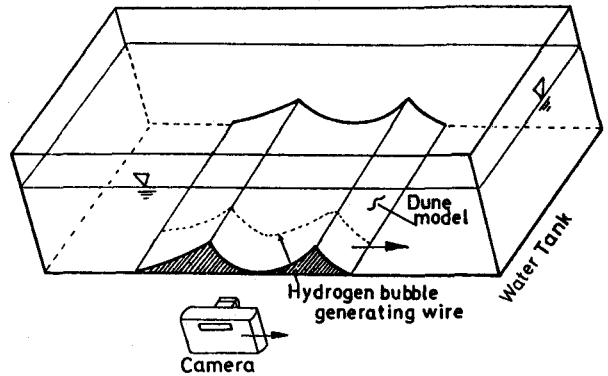


Fig.2 Schematic diagram of towing tank experiment.

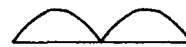
Table 1 Dimension of dune models

	wave length L (cm)	wave height h (cm)	steepness of dune S
Cusp head 1*	10.0	5.0	0.5
Cusp head 2	6.25	3.125	0.5
Cusp head 3	4.35	2.175	0.5
Cusp head 4	10.0	3.0	0.3
Cusp head 5	10.0	2.5	0.25
Cusp head 6	10.0	1.0	0.1
Cusp head 7	10.0	0.5	0.05
Round head	8.0	2.8	0.35
Two plate 1*	10.0	5.0	0.5
Two plate 2	10.0	4.25	0.425
Saw tooth 1	10.0	3.0	0.3
Saw tooth 2	10.0	1.0	0.1



Cusp head

Round head



Two plate

Saw tooth

Fig.3 Profile of dune models.

2.3 圧力測定装置

砂堆模型まわりの圧力分布の測定装置の概略をFig.4 (a)に示す。模型まわりの圧力はTable 1に掲げた模型のうちとくに*印を付したCusp head 1とTwo plate 1の2つについて測定を行った。圧力測定点は模型近傍であって、模型と一緒に動くタップ板(Tap plate)上の位置、Fig.4 (b)に示す⑨~⑫の各点である。これらの測定点の座標は

模型の2つの頂点の midpoint ⑩を座標原点としてTable 2に示したとおりである。ここでの測定に使用した圧力計は著者⁵⁾が開発した微圧計である。この微圧計は $3.07 \times 10^{-5} \sim 1.59 \times 10^3 \text{ cm H}_2\text{O}$ 程度の在来の圧力計では一般に検出が困難である流体中での任意の2点間の圧力差の測定に一定圧力勾配をもつまっすぐな円管内の発達した層流に対して成り立つHagenとPoiseuilleがそれぞれ独立に導いた関係式を適用するものである。すなわち、このような円管流では円管の両端の点1と点2の間の圧力差 ΔP は次のように表わされる。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 4\mu\ell U_m/R^2$$

ここに μ は流体の粘性、 ℓ は円管の長さ、 U_m は円管中心線上の最大速度そして R は円管の半径である。上式から μ は流体の物性定数であり、 ℓ と R とは円管の大きさにより決まる量であるので U_m がわかれば所要の2点間の圧力差を求めることが可能となる。

3. 実験結果

3.1 砂堆模型まわりの流れ

Photo.1 ははく離を伴う砂堆模型 Cusp head 1 まわりの流れを水素気泡により可視化した一例である。

Photo.1 での主流は砂堆模型に対して相対的に右から左へ流れている。この写真では右の模型頂部

流れが左の頂部に再付着している。そして模型の2つの頂部を結ぶ自由流線とPhoto.1中央部に見える半円形の砂堆模型面により囲まれた領域にはく離渦が形成されている。これはく離渦内の再循環流は自由流線に集中しているせん断応力により駆動されているわけであるがこの自由流線上の速度がある値以上になるとこの自由流線に沿っていわゆるせん断流不安定が生じる。Photo.1で自由流線に沿ってほぼ等間隔に並んでみえる小さい4個の渦はこうしたせん断流不安定の結果できたものであって、Photo.1の右側の模型頂部から間隔的に放射されたのち自由流線に沿って進んでいく。この渦の放射周波数 f の無次元量、ストローハル数 $St = fh/U_\infty$ (ここに h は砂堆模型の高さ、そして U_∞ は主流の速度)はレイノルズ数 $R = U_\infty h/\nu$ (ここに ν は水の動粘性係数)の関数であることがわかった。すなわち、レイノルズ数が一定値以下ではこの渦の放射はなくストローハル数は零であるが、さらにレイノルズ数を増すとストローハル数は徐々に増加し、レイノルズ数が一定値以上になるとストローハル数は

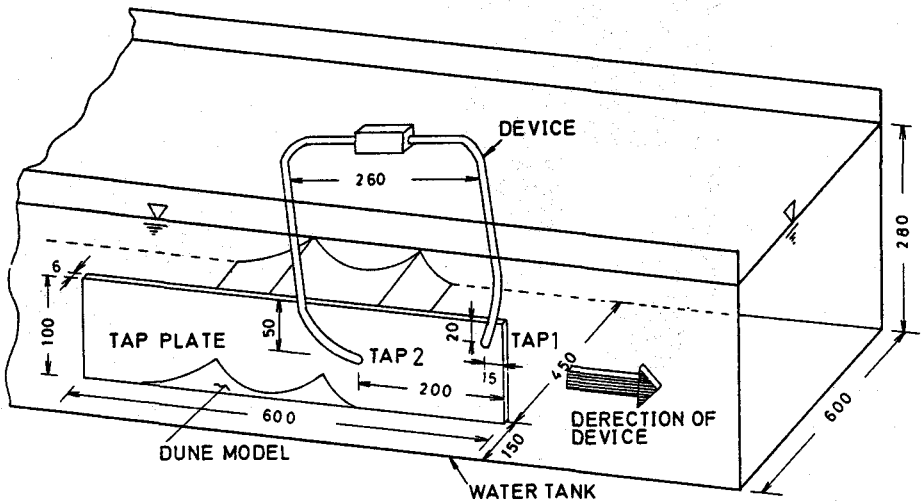


Fig.4(a) Schematic diagram of pressure measurement. (units: in mm)

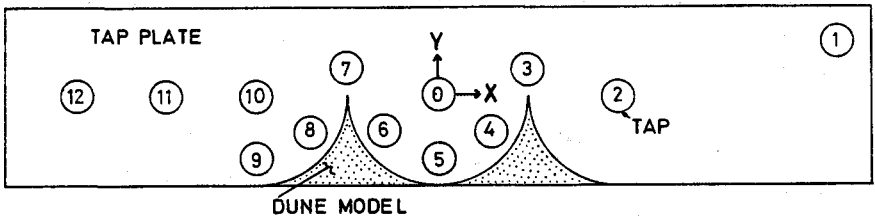


Fig.4(b) Position of pressure taps.

Table 2 Coordinate of pressure taps.

Tap No.	Abscissa x (cm)	Ordinate y (cm)
0	0.0	0.0
1	28.4	3.0
2	9.9	0.0
3	5.0	1.5
4	3.0	-2.0
5	0.0	-3.5
6	-3.0	-2.0
7	-5.0	1.7
8	-6.9	-2.1
9	-9.8	-3.5
10	-9.8	0.0
11	-14.8	0.0
12	-20.0	0.0

レイノルズ数に関係なくほぼ一定値に収束する。以上のようなここでの渦の性質が一樣流の円柱後方から放射されるカルアン渦と類似していることは興味深いことである。

また、Photo.1で自由流線より上方の流れは層流であるが、はく離渦内の流れはすでに乱流となっており水素気泡の細片が激しく拡散、混合している状況が見られよう。

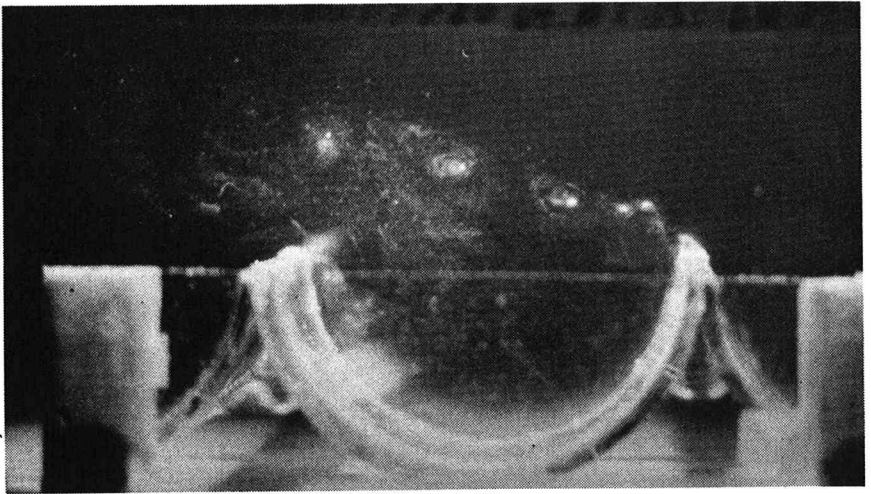


Photo.1 Shed vortices along the dividing free streamline.

Dune model; Cusp head 1, $R=1990$. The towed direction of the model is from left to right.

3.2 砂堆模型まわりの流れのはく離とはく離渦内の流れの安定性

砂堆模型まわりの流れのはく離するか否かの限界を与える条件、そしてはく離渦内の流れが安定か不安定かの限界を与える条件をFig.5に示す。ここに、Fig.5の横軸 $S = h/L$ (L は模型の波長)は模型の波形勾配であり、縦軸 R は先に定義したレイノルズ数である。Fig.5からまず明らかなことからは模型の波型勾配 $S \lesssim 0.1$ ならばレイノルズ数が数千の程度までは少くとも砂堆模型まわりの流れのはく離せずにその模型の表面に沿って下流へ流れ去る。ただし、Table 1に示した砂堆模型のう

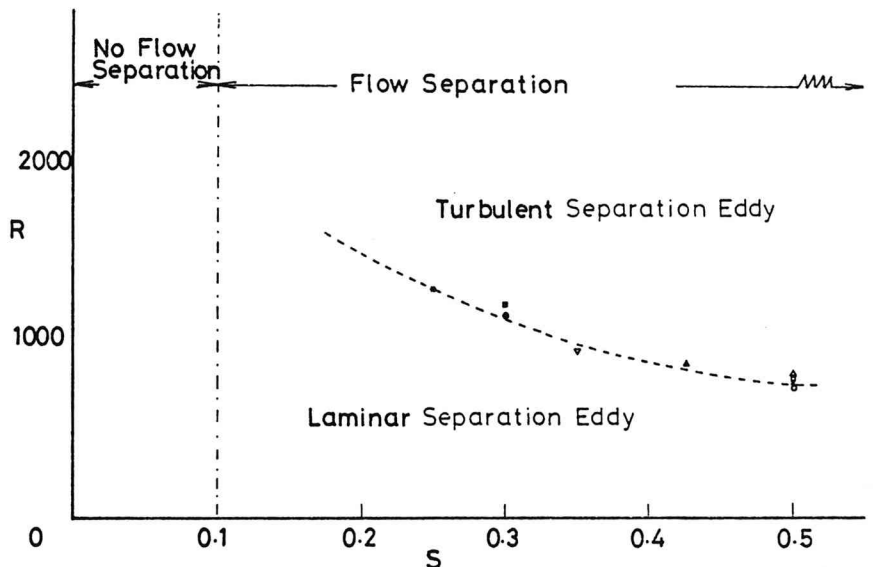


Fig.5 Criterion of flow separation and flow instability around dune models. S :steepness of dune model, R :Reynolds number.
 ○;Cusp head 1, △;Cusp head 2, □;Cusp head 3, ■;Cusp head 4,
 ✱;Cusp head 5, ▽;Round head, x;Two plate 1, ▲;Two plate 2,
 ●;Saw tooth 1.

ちの Saw tooth 1 や 2 のように頂部直後が垂直に切り立っている場合にはその波形勾配によらず頂部の高さのスケールのはく離渦ができるがここでの議論ではこうした局所的なではなく離渦は除外することにする。これに対して、模型の波形勾配 $S \geq 0.1$ ならばレイノルズ数の大小によらず模型の前方の頂部付近で流れはく離し 2 つの頂部間の谷部にはく離渦が形成される。さらにこの波形勾配の範囲ははく離渦か層流か乱流かで図中の破線により 2 つの範囲に分けられる。Fig. 5 から明らかなことは模型の波形勾配が大きいほどはく離渦内の流れの遷移レイノルズ数が小さいことである。このことは物理的にはレイノルズ数が同じでも波形勾配がより大きい模型ほど主流からはく離渦内への流体の連行率が大きいのではなく離渦内の流れがより不安定となり易いことを意味すると思われる。

はく離渦の下部の砂堆模型の形は Fig. 3 に示したようにさまざまな曲線あるいは直線から成り立っているが、いったん模型の頂部で流れはく離するとはく離渦の下部の流線は Fig. 1 に示したように局所的に凹面上の流れのそれに良く似たものとなる。このためにはく離渦内の流れが層流から乱流へと遷移する際には

Photo. 2 に示したようにはく離渦の下方の砂堆模型に沿う部分にいわゆるゲルトラー渦ができることが明らかになった。

Photo. 2 は砂堆模型 Cusp head 1 の 2 つの頂部の間の谷部にできたゲルトラー渦をミルクでトレースしたものである。その他の種々の砂堆模型についての実験で



Photo.2 The Görtler vortices appeared on the trough. Dune model; Cusp head 1, $R=978$. The towed direction of the model is from left to right. (after Nakagawa⁶).

モードによるゲルトラー渦が砂堆模型表面に現われることが確かめられた。しかしながら、そのゲルトラー渦の大きさ、軸の方向、強さなどは砂堆の形状によって異なったものとなる。この砂堆模型の形状がゲルトラー渦の形態にどのような影響を与えるかを示す例として Photo. 3 を示すことにする。これは再循環流が不安定になる際にできる鉛直な軸をもつ渦が模型の底面上の薄いミルクの層の上に描いた渦紋である。これらの渦は模型の幅方向にはほぼ等間隔に並んでおり各渦の回転方向が隣り合う渦のそれと逆向きになっている。

3.3 圧力分布

Fig. 4(b) に示した圧力タップ位置のうち一様流中のタップ No. 1 における基準圧力 P_∞ とその他の各タップ位置における圧力 P_i ($i = 0, 2 - 12$) の間の圧力差を次のように主流の動圧で正規化した無次元圧力係数で評価する。

$$C_p = (P_\infty - P_i) / \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \right)$$

ここに U_∞ は主流速度（あるいは模型の速度）、 ρ は水の密度である。Fig. 6 はこれら 2 つの砂堆模型面に沿う圧力分布をそれぞれはく離渦内の流れが層流と乱流の場合について示したものである。ここに図の横軸と縦軸はそれぞれ圧力タップの x 座標とうえの無次元圧力係数を示す。また、この図中の実験値の上に添えてある数字は Fig.

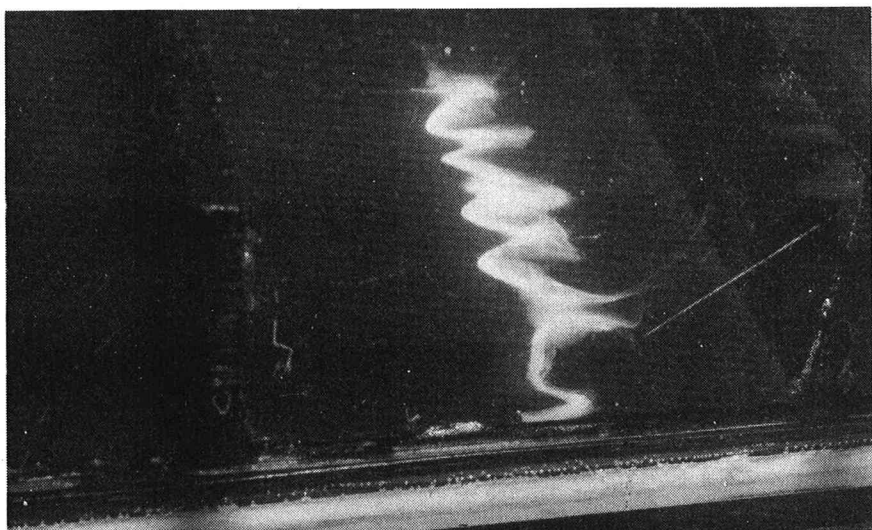


Photo.3 Milk trace of the cylindrical vortices with vertical axis on the trough. Dune model; Two plate 1, $R=690$. The towed direction of the model is from left to right.

4 (b) および Table 2 に示したタップ No. である。

なお、実験条件と

しては水

温 17.7°C 、

水深 27.6

cm の条件

下で、は

く離渦が

層流であ

る場合の

模型の走

行速度は

1.14 cm/s 、

一方、は

く離渦が

乱流であ

る場合の

模型走行

速度は、

3.67 cm/s

であった。

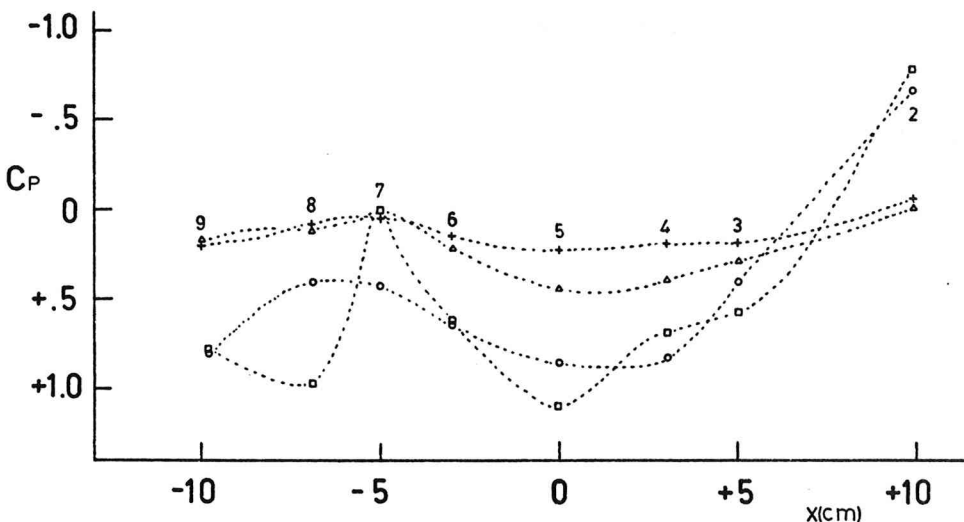


Fig.6 Static pressure distributions along the contour of the dune models. x ; distance from the origin, C_p ; nondimensional pressure coefficient. $\square$; Cusp head 1 (laminar), $\circ$; Two plate 1 (laminar), $\triangle$; Cusp head 1 (turbulent), $+$; Two plate 1 (turbulent).

Fig. 6 から明らかなように、はく離渦内の圧力は一様流中の基準圧力 P_∞ より常に低く、またははく離渦内の流れが層流、乱流にかかわらず砂堆模型 Cusp head 1 の表面に沿う圧力分布の方が砂堆模型 Two plate 1 の場合よりも谷中心の近傍で強い低圧値をとることがわかるだろう。また、Fig. 6 から、はく離渦内が乱流になった場合の方が層流の場合と比べて圧力分布がより平坦であることがわかる。このことは、はく離渦内が乱流になった場合には、はく離渦内での拡散、混合が盛んになり圧力の均一化が促進されることを示唆している。ただし、前述のように、はく離渦が層流、乱流の場合で 2 点間の圧力差を無次元化するのに使った速度 U_∞ の値が異なるので層流の場合の方がここでの無次元圧力係数 C_p に関しては大きい、この圧力差の絶対値 $|P_\infty - P_i|$ 自体ははく離渦が乱流の場合の方が一般には大きい。

このほかに、タップ Nos.、2、3、0、7、10、11 そして 12 を結ぶ模型の底面がほぼ等しい高さにおける圧力分布も求めたが、この分布も Fig. 6 と定性的には同じような傾向を示すことがわかった。

4. 議 論

Dawin¹⁾ Raudkivi²⁾らの研究および前章までに示した本研究の結果を勘案すると、はく離を伴う砂堆まわりの流れ、河床の掃流力分布、河床の圧力分布そして河床土砂の浸食、堆積の様子はそれぞれ Figs. 7(a)、(b)、(c) そして (d) に示したようになるものと思われる。

Fig. 7 (a) から砂堆面に沿う流れは、はく離渦の下部では主流方向とは逆となり、その他の部分では主流方向と一致する。したがって、もしもこれらの上流、下流へ向う砂堆面に沿う流れが流路床の砂礫の掃流限界を越えれば、これらの砂礫はそれぞれ上流、下流へと運搬されることになる。事実、著者ら⁷⁾は移動砂床における蛇行実験中に河床にできた砂堆のまわりの流れが、はく離する場合には河床の微粒砂が流れの再付着点からわき出すように上流、下流の両方向へ運搬されていくのを観察している。

Fig. 7 (b) と (c) はそれぞれ Fig. 7 (a) の流れに対応する砂堆表面の掃流力と静水圧頭の予想分布を示す。さらにこのような場合には砂堆を形づくる砂礫の浸食と堆積が Fig. 7 (d) に示した位置に起こるものと予測することができよう。

以下に著者が Fig. 7 を描くに際して頭の中にいっていた、はく離を伴う砂堆周辺の流れと土砂の浸食、運搬および堆積の機構を

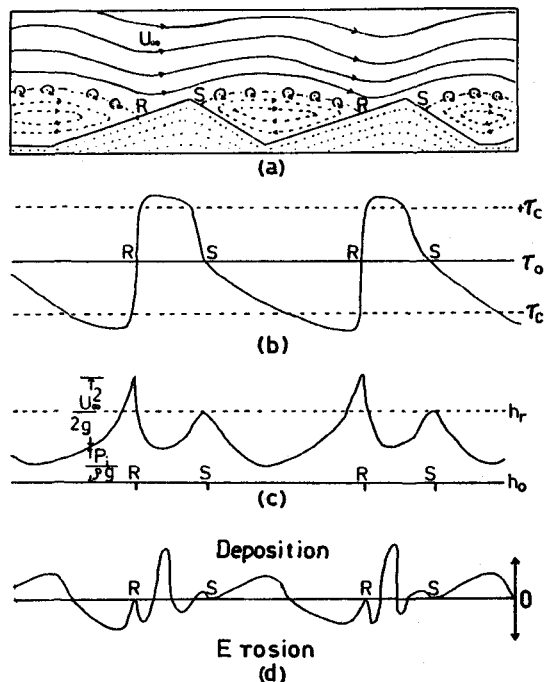


Fig. 7 A hypothetical flow around dunes, the bed shear stress distribution, the pressure distribution on the bed, and the possible movement of the sediment. (a) the flow pattern, (b) the bed shear stress distribution, (c) the pressure distribution on the bed, (d) the movement of the sediment. S; separation point, R; reattachment point, τ_c ; critical bed shear stress, τ_0 ; zero bed shear stress, h_r ; reference static pressure head at the separation point, h_0 ; zero static pressure head, $P_i/\rho g$; static pressure head, $U_\infty^2/2g$; dynamic pressure head.

The small vortices along the dividing free streamline (one point chain line in (a)) show the vortices generated due to the shear flow instability, while the recirculatory flow region behind each crest shows the separation eddy.

概略記しておくことにする。まず砂堆の頂部直後ではなく離した流れがFig. 7 (a)の一点鎖線で示した自由流線に沿って、後続の砂堆前部の比較的なだらかな傾斜面に再付着する。この間、自由流線に沿う流れのせん断流不安定によりほぼ一定周波数で放射された渦がこの自由流線をその軌跡として間けつ的に再付着点に到達する。この渦が再付着点付近の乱れの強さに間けつ性を与えると同時に渦のエネルギーの多くが再付着点近傍の河床の浸食に費やされることになる。Raudikivi²⁾やWilliams & Kemp³⁾は乱れの強さが流れの再付着点付近でとくに高いという実験結果を報告しているが著者はこの原因の1つとして上述の間けつ的に再付着点へ到達する渦をあげたい。再付着点ははく離した流れが壁面に再付着する際にできる上流と下流との流れの分岐点であり流速が零となるいわゆるよどみ点の一種と解釈できる。この理由から、再付着点上での河床の浸食はなく、その前後で河床の浸食が著しい。すなわち、再付着点より上流側では再付着点よりわずかに前方の砂堆表面が浸食され掃流砂としてより上流側の砂堆頂部直後の谷部に堆積すると同時にこのうちの一部は浮流砂としてはく離渦内を再循環する。一方、再付着点より下流側では、再付着点よりわずかに後方の砂堆表面が浸食され掃流砂として後続する砂堆前部傾斜面に堆積する。この土砂堆積部の後方にはもう一つの砂堆表面浸食部があり、ここで浸食された砂礫は掃流砂として後続の砂堆頂点からはく離点までの砂堆表面に主として堆積するが、このうちの一部はその後のはく離渦内へ混入しはく離渦下方の砂堆表面に堆積あるいは浮遊流砂としてはく離渦内を再循環することになる。こうした河床面の浸食と堆積の機構により土砂は主として砂堆頂部直後の谷部に堆積するためにFig. 7 (a)に示したような河床波列は下流方向へ進むことになる。このように、ここでの砂堆と流れとの干渉機構が実際の河床にできた砂堆の挙動を定性的には正しく説明していると考えられる。

5. 結 論

本研究により得られた知見を要約すると次のとおりである。

- 1) 砂堆模型まわりの流れがはく離するか否かは砂堆の波形勾配の大ききで決まる。また、この流れがはく離する場合にできるはく離渦内の流れが層流か乱流かは砂堆の波形勾配と主流速度と砂堆の高さからつくったレイノルズ数の両者に依存する。
 - 2) 砂堆模型まわりの流れのはく離点と再付着点とを結ぶ自由流線に沿う流れがせん断流不安定になると間けつ的な渦がはく離点直後で生成、放射され自由流線に沿って再付着点に達するが、この渦が集中的な乱れを伴うので再付着点近傍の乱れの分布および浸食に著しい影響を与える。
 - 3) 砂堆頂部の間の谷部にできたはく離渦内の流れが不安定になる際にはく離渦の下部の砂堆模型表面に沿う部分にいわゆるゲルトラー渦が形成される。ただし、砂堆模型の形状の変化に伴ないこうしたゲルトラー渦の大きさ、軸の方向、強さなどが変わる。
 - 4) はく離渦内の圧力は主流中の基準圧力より常に低い圧力を取り、その圧力差ははく離渦内の流れの状態すなわちこの流れが層流か乱流かということと、砂堆模型の形状に依存する。たとえば、はく離渦内の流れが乱流の場合の方が層流の場合よりも模型まわりの圧力分布を均一化する傾向がある。
 - 5) 実際の河床面にある砂堆と流れとの干渉の機構についての一つの有用な示唆を得ることができた。
- 最後に、本稿執筆に際し有益な助言をいただいた名古屋大学高木不折教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Darwin, G. H. Proc. Roy. Soc. London A36, 18 (1883)
- 2) Raudkivi, A. J. Proc. ASCE, HY 6, 89 Paper 3692 (1963)
- 3) Williams, P. B. & Kemp, P. H. Proc. ASCE, HY 6, 98, Paper 8952 (1972)
- 4) Etheridge, D. W. & Kemp, P. H. J. Fluid Mech. 86, 545 (1978)
- 5) Nakagawa, T. ASME, J. of Fluid Eng. Dec. (1980)
- 6) Nakagawa, T. Die Naturwissenschaften, 66, S. 468 (1979)
- 7) 中川武夫、中村俊六、真新哲朗、昭和55年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集(掲載予定)