

移動粒子周辺の乱流構造に関する研究

Structure of turbulence around moving particles

北海道大学大学院 ○ 学生員 藤江 稔 (Fujie Minoru)
 北海道大学大学院 正会員 森 明巨 (Mori Akio)
 北海道大学工学部 佐々木 直 (Sasaki Tadashi)

1. はじめに

橋の上から川のの流れを見ていると、1cm 弱の砂礫が河床に静止しているのであるが、その上を小粒径の砂礫群が数 10cm の縦長長円形を保って移動して行くのが見えた。何故か拡散しない。どうしてそんなことが起こるのであろうか。粒子群と流れの間に何らかの相互干渉があるに違いない。そもそも流砂における saltation や浮遊の運動機構には、粒子による乱流変調が深く関わっていると考えられる。そこで著者らは、剪断流中を回転流下する粒子による乱流変調に着目し、そこに現象の手がかりを求め研究を行ってきた。

本稿では2節でこれまで行ってきた研究について、3節では新たに行った二次元三粒子実験について、4節で3Dでの可視化の試みについて述べる。

2. これまでの研究

外側が回転する2重円筒間の安定な二次元流れで実験を行って次の二つの機構の組み合わせにより、粒子前後に i-burst と名づけた大規模な組織構造の発生するのを観察した¹⁾。

- ① Acrivosら²⁾によって理論的に予測され、実験および数値解析によって確認された粒子前後の渦状構造の発生(図1)。
- ② この渦状流が、外側円筒の回転によって生成される高渦度流体を吸いだしてburst状の大規模組織構造への発達。(図2)

次いで円形水路(図3)を使った滑面境界層実験を行い、更に活発な組織構造が発達することを確認した¹⁾。これは、底面近傍の低速、高渦度の流体の吸い出しによるもので、固定粒子背後の乱流よりはるかに規模、強度が大きい。以上の結果から、低速、高渦度流体を生成する機能の高い粗面境界層流れの実験に研究を進めた。図3に示した水路に二次元粒子を投下して以下の結果を得た。

a) 二次元一粒子実験

この実験では次のような saltation 継続機構が見出された。回転粒子が引き起こす上昇流、河床との摩擦・衝突によって粒子の移動、回転の速度が落ちる。そこへ粒子上流域から粒子下方に入り込む流れが発生し、粒子は逆回転して上昇する。³⁾

b) 二次元二粒子実験

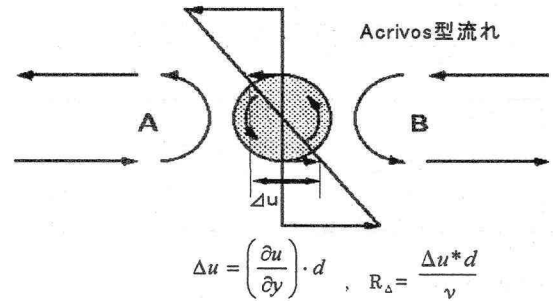


図1

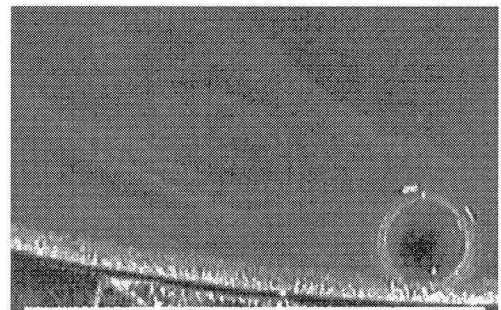


図2

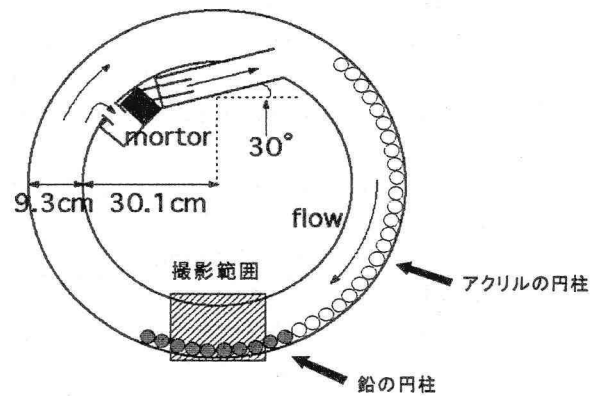


図3 実験装置

上流側の粒子をA粒子、下流側の粒子をB粒子とすると、2粒子間の流体がA粒子下流側から発生したburst状の乱れによって吸い出されて噴出し、このために生じる粒子間の水圧低下がA,B粒子の速度の増、減を引き起こした。その後2粒子は衝突しA粒子の流下速度は著しく

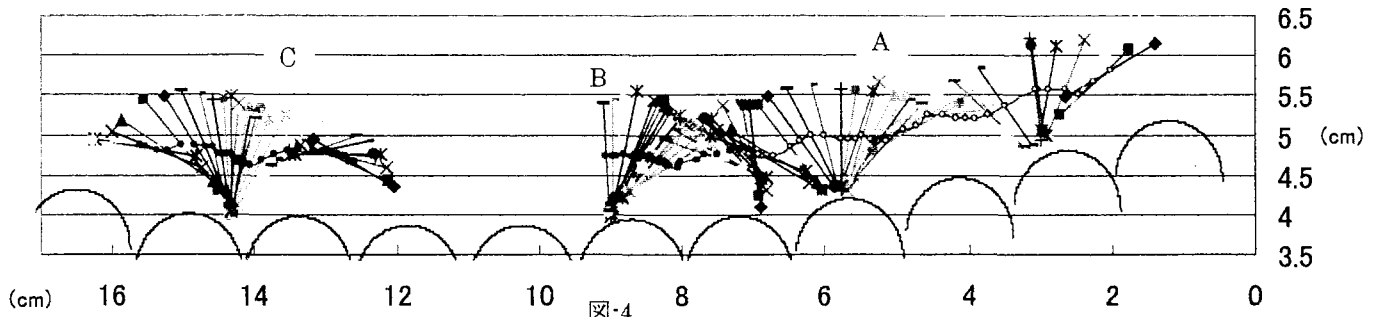


図-4

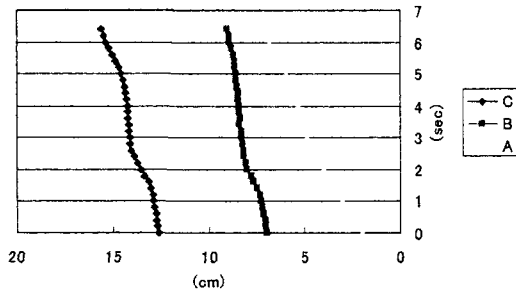


図-5

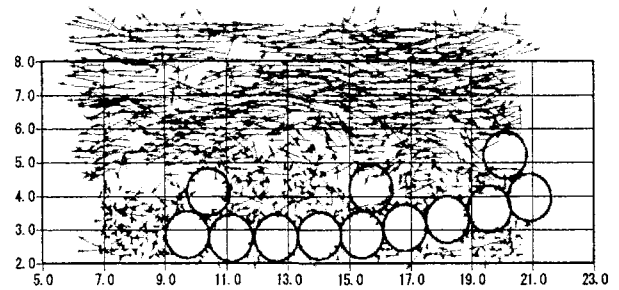


図-6(a)

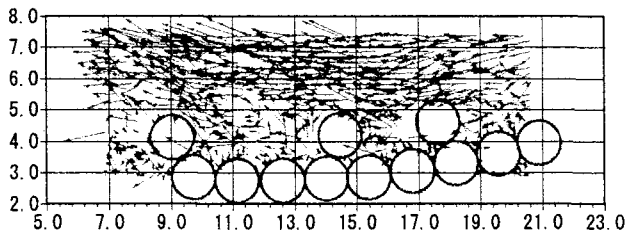


図-6(b)

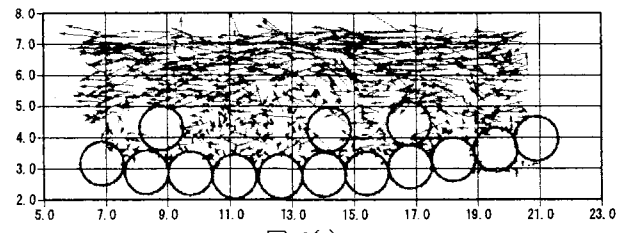


図-6(c)

低下する。そのとき A 粒子は単一粒子実験で見られたような粒子下方にもぐりこむ流れによって河床から B 粒子を追い越すように離脱し、流下を再開して A、B 粒子は役割を交代する。⁴⁾

これらの結果だけでは冒頭の現象を説明するのには不十分である。そこで実現象に近づけるために粒子を増やして 3 粒子実験を行った。

3. 二次元三粒子実験

2 粒子実験と同じ実験装置を用いた。3 粒子を 4 粒子分のほぼ等間隔において流下を開始させた。図-4 に 0.4s 毎の各粒子の直径と中心の移動を示した。図-5,6 は 3 粒子の走時、PIV 解析結果である。平均移動速度は A が 0.38cm/s、B が 0.16cm/s、C が 0.23cm/s で、平均回転速度は A が 0.45rad/s、B が 0.24rad/s、C が 0.30rad/s であった。上流側 2 粒子 A、B の移動および A、B 間の流れの構造は、2 粒子のときとほぼ同じで上流側粒子 A と B 粒子の間に burst 状の乱れが発生し、A 粒子は B 粒子に二倍以上の速度で追いつく。最下流粒子 C は、初期には B 粒子とほぼ同じ速度で流下している。これは単一粒子のみのものより低速であるが、図-6 にみられる B-C

間の上昇流の作用による。またその上昇流と A-B 間の水圧低下によって B 粒子の回転が弱められ、その分上昇流も弱くなり B が C に追いつくことはない。A が B に接近すると B の回転がさらに弱まって B-C 間の上昇流は殆ど無くなり C 粒子は B の作用の影響域を離脱、流下する。よって本質的には 2 粒子と同様の機構であると言える。

以上の二次元実験の解析結果は、粗面上を回転・流下する粒子によって誘導する乱れがその粒子自身の運動に強く作用することを示している。これらは基本的には i-burst の作用であるがその様子は粒子数によって変わる。ところで、単一粒子の saltation が流体力によって継続し得ることが観察されていることから、移動床においても i-burst の発生とこれと粒子の相互干渉が十分に考えられる。そこでこれを基にして冒頭で述べた流砂現象の説明を試みる。移動粒子濃度 n_d が小さいときには i-burst による単一粒子の saltation の継続機構が働くと考えられるが、 n_d が大きくなり、粒子間平均距離が小さくなれば、複数の移動粒子間に i-burst を介した相互干渉が生じ得る。3 次元粒子の i-burst は 2 次元粒子のものより弱いだらうから、複数の粒子が受けるとしても、顕著な速度低下を受けるものはせいぜい 2 粒子程度で

あろう。また3次元凹凸を持つ河床との衝突や三次元乱流の流体力によって容易に下流側粒子の i-burst 影響域を離脱し得る。しかし、周辺にはこれの代わりとなる複数の粒子があって、新たに影響域に入り得る。また、作用粒子が更に上流の粒子の影響下に入り得る。このようにして、2粒子 coupling を中心とした couple の相棒を次々に代えつつ couple 全粒子が couple 網を作って、集団で流下することが考えられる。このような相互作用が生ずるのは顕著な Acrivos 流れが起こる $R_{\Delta}=100\sim 300$ の範囲である。従って、2粒径の移動床では起こらない。また単一移動粒子のときにこの範囲にあっても粒子の濃度が高くなり、高濃度の i-burst によって速度勾配が著しく減少すると相互干渉は低下する。このときには、流下形態が浮遊砂の卓越などに遷移することが予定される。

このように3粒子実験で二次元粒子周りの流れの構造はおおよそわかってきた。次のステップとして三次元粒子の可視化を試みた。

4. 三次元実験

4.1 実験方法

実験に使った水路は側壁アクリル製で、幅 28cm、長さ 395cm である。これに図-7 のように河床粒子を配列した。

移動粒子に直径 3.0cm、比重 1.98 の球体を用いた。また粗面境界層をつくるために、水路河床に直径 4.0cm のピンポン球を、さらに計測域では移動粒子との反発をできる限り抑えるために、直径 3.5cm のまりも羊糞を用いた。移動粒子周辺流や水路内での流れの様子を可視化するために、Methylene Blue (CI 52015) と Uranine の染料を用いた。水路中央の幅 28cm×長さ 35cm×高さ 15cm の範囲を計測域とし、壁面よりビデオ撮影をした。粒子なしの時の流速分布を図-8 に示す。粒子レイノルズ数は $R_{\Delta}=1800$ である。

4.2 実験結果

三次元水路に 1 粒子を投入し、その挙動を観察した。写真-1 は可視化したものの 1 コマである。これから移動粒子の直下流に上昇流が出ているのが分かる。

二次元のときにみられた移動粒子の回転速度 ω と、移動粒子が回転することによって引き起こされる上昇流の速度の関係について、三次元についても考えてみる。

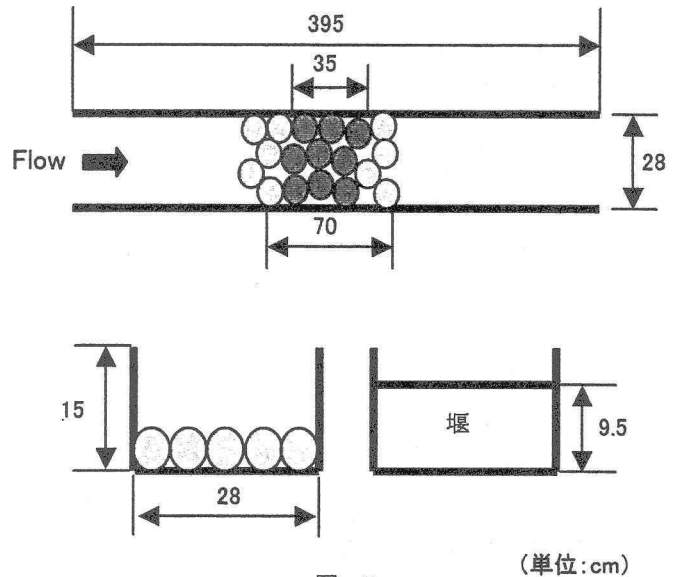


図-7

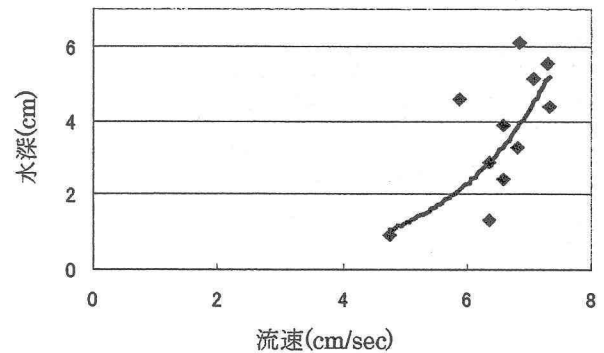


図-8

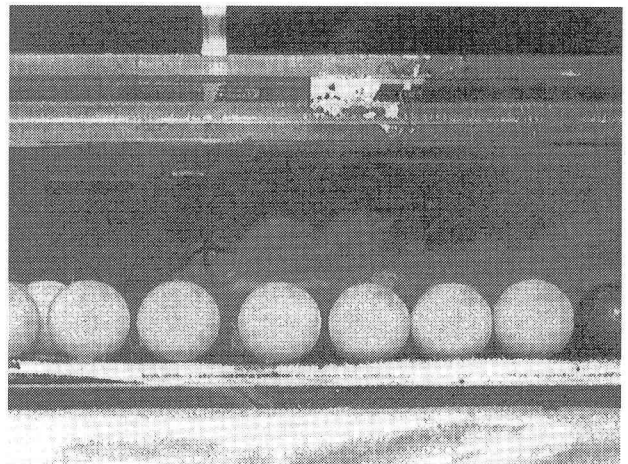


写真-1

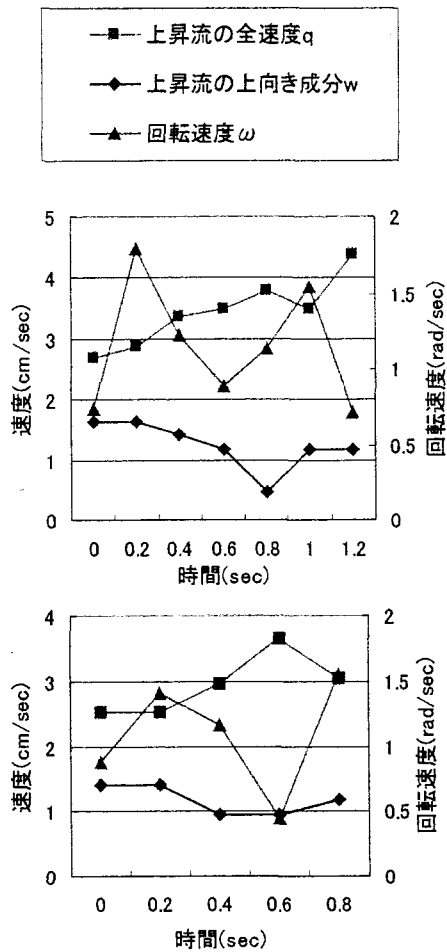


図-9

回転速度と上向き速度の関係

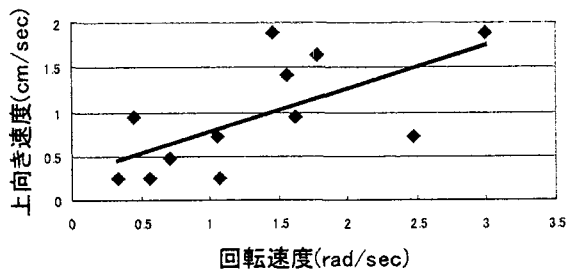


図-10

図-9は上昇流の上向き成分 w と全速度 q とに分けて、回転速度 ω とともに時間変化をみた一例である。

上昇流の上向き成分 w と回転速度 ω の関係に着目すると、変化の傾向はおおよそ対応しており、ほぼ同調した動きをしているとみなせる。図から分かるように、 ω が最大のときに w も最大になっている。さらに図-10に示すように、 w と ω は正比例の関係もあることが分かる。これらの結果は、Acrivos 効果によるものである。

また、上昇流の全速度 q と回転速度 ω の関係に着目すると、両者には逆相関があることが分かる。 q が極大のとき ω が極小になり、 q が極小のときは ω が極大になっている。これらの結果は、移動粒子の回転作用により説明ができる。この回転作用が粒子周辺流に burst 的な乱れを引き起こし、これらが一定時間おきに下流に飛び出すことによって粒子自身の回転が促される。つまり粒子の回転の加速 \rightarrow burst 的な乱れの発生 \rightarrow 回転の抑制 \rightarrow burst 的な乱れの飛び出し \rightarrow 回転の加速 を繰り返している。この過程における時間差=位相のずれが回転速度と上昇流速度の逆相関の原因であろう。

参考文献

- 1) 清水啓之、森明巨、板倉忠興 (1999): せん断流中の自由粒子まわりの不安定性について, 土木学会北海道支部 論文報告集 第55号 (B)
- 2) CHARLES A KOSSAK and ANDREAS ACRIVOS (1974): Steady simple shear flow past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers J.Fluid Mech, vol.66,part 2,37
- 3) 広瀬健治、小林雄介、森明巨(2002): 粒子自身が誘導する乱れによる saltation 運動, 土木学会第57回年次学術講演会 論文報告集 II-175
- 4) 藤江稔、森明巨(2003): 粗面境界層上を流下する2粒子周辺の流れの構造, 土木学会第57回年次学術講演会 論文報告集 II-148