

プラントルの第二種二次流が卓越する場における浮遊砂の運動機構と時間平均流構造の変化

中央大学 学生会員 ○福島 千乃 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二
 中央大学研究開発機構 正会員 高鋦 裕也

1. 序論

浮遊砂にとって、流れの乱れはその運動を決定する重要な要因である。同時に、流れ場にとっても、浮遊砂の運動から受ける影響は、乱れの三次元構造を決定する上で無視できないと考えられる。したがって、開水路乱流の三次元構造と浮遊砂の運動機構の関係を解明することは、移動床水理学の基礎でありかつ工学的に重要な課題であるが、その計測の難しさのために、十分な理解が進んでいないのが現状である。本研究では、APM法¹⁾を用いた数値解析により、幅が狭い水路に発達したプラントルの第二種二次流場についての高鋦ら²⁾の検討結果をもとに、浮遊砂の運動機構と浮遊砂の二次流構造に与える機構を明らかにする。

2. 実験条件と数値解析法

図-1に示すように、実験では、直径 $2r=8\text{mm}$ の円柱粗度を底面に敷き詰めた長さ1.5m、幅0.02m、勾配1/20の直線水路に定常流(0.171l/s)を供給した。浮遊砂には、直径 $d=1\text{mm}$ 、密度 $\rho_s=1.20$ の球形粒子群を $0.2\text{m}\leq x\leq 0.6\text{m}$ の範囲にランダムに投入(流砂量 $Q_s=9.38\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$)した。投入粒子の初速度には、余計な運動量を持ち込まないために、粒子重心座標から一番近い流速評価点の流速を与えた。水路上流端($x=0.00\text{m}$)には、境界層を早く発達させるため、上流端から十分に離れた粗度要素20個分の位置($x=0.16\text{m}$)での流速を時々刻々と与えた。また、下流端($x=1.50\text{m}$)には一つ上流側のメッシュの流速を与え、下流端水深を制御した。乱流のサンプリング数は禰津らの手法³⁾にならい $4.0\times 10^4\text{s}$ ごとに計測し、平均時間は1sとした。

本解析はAPM法¹⁾を用いて、流れはEuler的に、粒子運動はLagrange的に解析する。表-1, 2に解析パラメータ、解析水理量を示す。

3. 流れ構造と浮遊砂の運動

図-2に粒子投入前後の粗度頂部断面の二次流構造を示す。粒子投入前の流れは、レイノルズ応力勾配と圧力勾配の不均衡に伴う二次流セルや水路中央の下降流が示されている。²⁾これに対し、粒子群を含む流れでは、粒子群投入前の流れと比べ、特に、側壁沿いの上昇流や粗度頂部付近の二次流が小さくなる。これは、

キーワード 浮遊砂, 二次流, 乱流構造

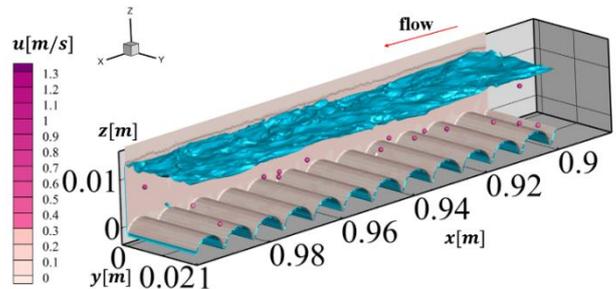


図-1 水路拡大図 (左岸壁を非表示にしている)

流体計算格子サイズ(Δ)	0.00025	m
粒径と流体計算格子幅の比(d/Δ)	4	-
流体運動解析の刻み時間	2.0×10^{-5}	s
粒子運動解析の刻み時間	2.0×10^{-7}	s
水の密度	1000	kg/m^3
粒子の密度	1200	kg/m^3
Smagorinsky定数	0.173	-
縦弾性係数	2.0×10^4	kg/cm^2
ポアソン比	0.388	-
反発係数	0.5	-
摩擦係数	0.38	-

表-1 解析で用いたパラメータ

径深	5.92	mm
水深	14.5	mm
アスペクト比(b/h)	1.38	-
相対水深(h/r)	3.63	-
主流速の最大値	0.947	m/s
断面平均流速	0.693	m/s
摩擦速度	0.084	m/s

表-2 水理量

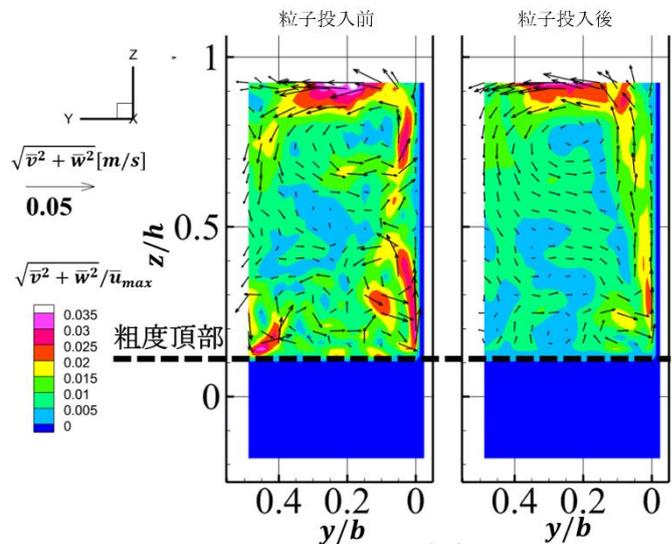


図-2 二次流速コンター図

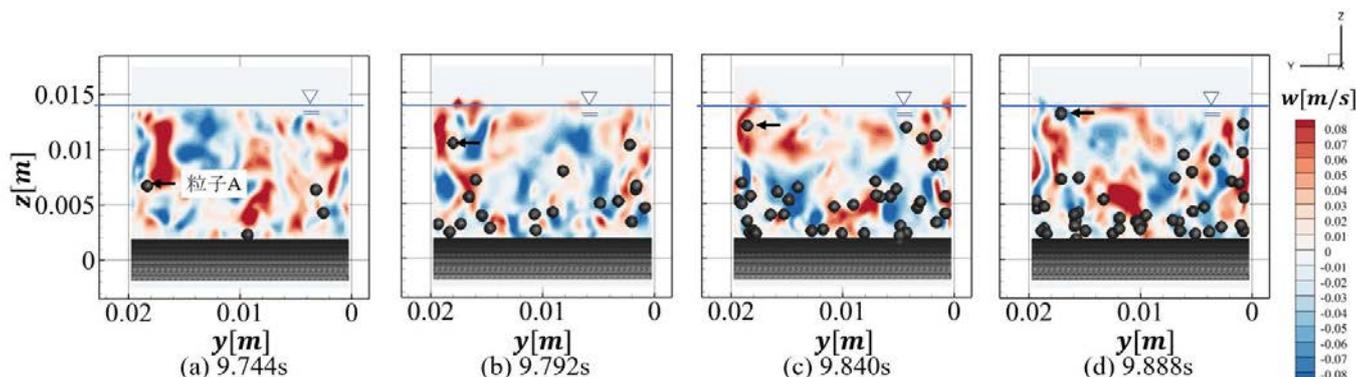


図-3 水路上流端から見た粒子の横断運動

流体の乱れエネルギーが、粒子を上昇または下降させるために費やされたためと考えられ、その機構については今後の検討課題である。

図-3, 4 に粒子 A の縦断位置における鉛直方向流速と粒子高さの時間変化を表す。図-3 の粒子は $x=1.00\text{m}$ の地点から粒子 A の間に存在するもののみを示す。(a) で左岸側壁付近の上昇流体塊中に存在する粒子 A に注目すると、(b) から (c) にかけて側壁沿いを上昇し、(d) で水路中央側に輸送され、その後下降する。粒子 A は側壁沿いを上昇する outer secondary flow (OSF) の作用により上昇している。一方、水路中央付近に存在する粒子は、上昇流体塊中に存在し鉛直上向きの力を受けても、粒子 A と比較して低い位置に留まっている。これは、粗度要素を乗り越える流れにより上昇しても、下降流を受け、高い位置まで上昇し得なかったと考えられる。

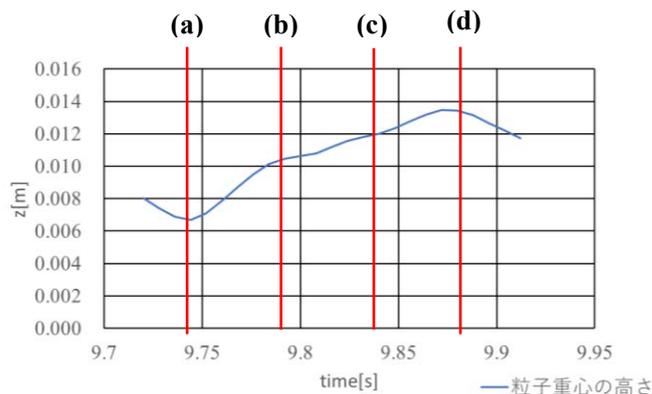


図-4 粒子高さ

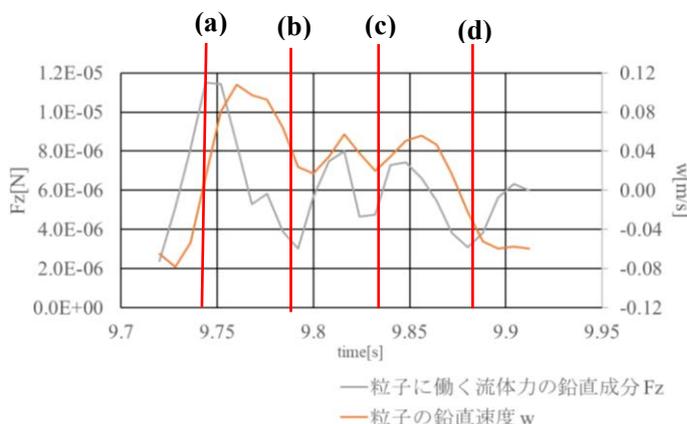


図-5 粒子に働く流体力の鉛直方向成分と鉛直方向速度

図-5 に粒子 A に働く流体力の鉛直成分と鉛直速度の時間変化を示す。粒子 A に働く流体力の鉛直成分が増加・減少するのに追従して、粒子 A の鉛直速度が増加・減少している。すなわち、粒子が周囲の流体塊から力を受けた後、遅れ時間を伴って上昇している。これらの一連の粒子と周辺流体塊の運動は、関根ら⁴⁾の実験で確認されているものと同様と考えられる。

4. 結論

本研究により、流体と密度差を持つ粒子群の混入に伴う運動によって、二次流速の大きさが小さくなることが確認された。さらに、側壁近傍で浮遊する粒子は OSF に伴って水面付近まで上昇するが、水路中心付近で浮遊する粒子は側壁近傍の粒子ほどは上昇しないことが確認された。これにより、浮遊砂の密度の大きさ、粒子の大きさと濃度等が二次流の強度や構造に影響することが推定され、これらについては今後の検討課題とする。

参考文献 1) Fukuoka et al., *Advances in Water Resources*, vol.72, pp.84-96, 2014. 2) 高鋤, 福岡: 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_1087-I_1092, 2020. 3) 禰津: 土木学会論文報告集, vol.261, pp.67-76, 1997 4) 関根ら: 土木学会論文集 B1(水工学), vol.77, No.2, I_691-I_696, 2021.