

時間平均乱流と浮遊粒子の運動に及ぼす粗度の縦断間隔の影響

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

1. 序論

開水路粗面乱流場の三次元構造と浮遊砂の運動機構を明らかにすることは、工学的に重要な課題である。浮遊砂の運動機構については、PIV 解析による水路実験を中心に分析され、有用な知見が得られてきた¹⁾²⁾。しかし、流砂運動に及ぼす時間平均流構造及び乱流構造や、粗度条件がこれらに及ぼす影響は十分に明らかになっていない。

そこで、本研究では、プラントルの第二種二次流が発達するアスペクト比の小さい水路に縦断的に異なる間隔で粗度要素を配置し、個々の粒子と粒子周りの流れ場を解くことの可能な詳細な数値計算³⁾を行い、粗度要素間隔が流れの時間平均流構造及び粒子運動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 数値実験概要

図-1 に示すように、実験では、長さ 1.5m、幅 0.02m、勾配 1/20 の一様な直線水路に定常流(0.0171 l/s)を供給した。また、底面には直径 8mm の円柱粗度を密($l=0.2\text{mm}$)・疎($l=24\text{mm}$)に配置し、clear flow の流れをそれぞれ Case1, Case3 とした。さらに、Case1, Case3 に直径 1mm、比重 1.2 の球形粒子群を投入したものを Case2, Case4 とした(供給粒子量 $9.8\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$)。粒子の初速度には粒子重心座標から一番近い流速評価点の流速を与え、流れに追従するようにした。乱流のサンプリング数は、禰津⁴⁾の手法に倣い、 $4.0\times 10^{-4}\text{s}$ ごとに計測し、乱流の平均時間は 1s とした。

本研究は APM 法³⁾を用いて、流れは Euler 的に、粒子運動は Lagrange 的に解析する。表-1 に水理量を示す。解析パラメータについては、著者らの既往研究⁵⁾に示す。

3. 流れの時間平均構造

本章では、Case1 及び Case3 の clear flow の時間平均流構造について分析する。図-2 に Case1 及び Case3 の水路中心線沿い($y/b=1/2$)における主流速の縦断面分布、断面 I 及び断面 II における主流速及び二次流速の横断面分布を示す。図-2 (i)に示すように、粗度間隔の狭い Case1 では、 $z/H\geq 0.2$ の領域において主流速分布の縦断的な変化は小さく、粗度要素が流体に与える影響は小さい。一方、粗度間隔が広い Case3 では、図-2 (ii)に示すように、 $z/h\leq 0.6$ の領域において主流速分布が大きく歪み、粗度要素の背後における逆流域、渦層の発達域等、粗度要素が主流速及び二次流速分布に与える影響は大きい。

また、図-4 に示すように、粗度間隔の大きさに関わらず、側壁沿いを上昇する二次流である OSF や粗度要素を乗り越える流れが発生する。しかし、Case3 は Case1 に比べ、強い二次流が広範囲において発生しており、平均流速 U_{mean} (表-1)と二次流速の最大値 $|\overline{sv}_{max}|$ の比は、Case1 では 2 割弱、Case3 では 6 割弱となる。これら二次流によ

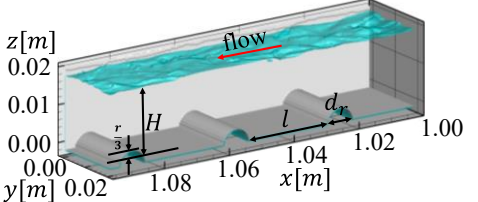


図-1 水路拡大図(Case3)

表-1 水理量

	Case1	Case2	Case3	Case4	
R : 径深	5.87	5.87	6.56	6.55	mm
h : 水深	14.2	14.2	19.1	19.0	mm
H : 水位	14.9	14.9	17.9	17.9	mm
b/h : アスペクト比	1.41	1.41	1.05	1.05	-
$r = d_r/2$: 粗度要素半径	4.00	4.00	4.00	4.00	mm
l : 粗度要素間隔	0.20	0.20	24.00	24.00	mm
h/r : 相対水深	3.55	3.55	4.78	4.75	-
$\bar{u}_{max}$: 最大主流速	84.7	84.8	66.9	66.4	cm/s
U_{mean} : 平均流速	61.5	62.0	44.4	44.4	cm/s
$U_* (= \sqrt{gRI})$: 摩擦速度	5.36	5.36	5.67	5.67	cm/s
$Re (= U_{mean} R/\nu)$: バルクレイノルズ数	3610	3640	2910	2910	-
$Re_p (= (U_{mean} - \bar{u}_p)d/\nu)$: 粒子レイノルズ数	-	335	-	185	-
$Fr (= U_{mean}/\sqrt{gR})$: フルード数	2.56	2.58	1.75	1.75	-

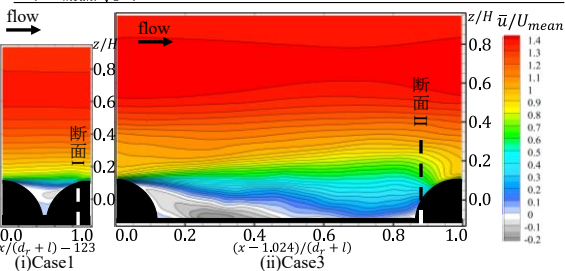


図-2 主流速の縦断面分布

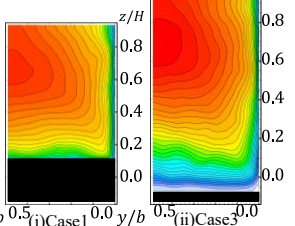


図-3 主流速の横断面分布

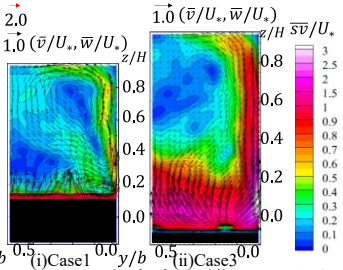


図-4 二次流速の横断面分布

キーワード 浮遊砂、二次流、瞬時二次流、粗面乱流

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

り、図-3 に示すような、主流速の最大値が水面下に発生する velocity dip 現象が発生し、主流速分布は歪む。

4. 粒子の運動と周囲の流体塊

本章では、Case2 及び Case4 において浮遊運動する粒子に着目し、着目粒子周囲の流体塊の鉛直方向流速と粒子運動の関係を分析する。図-5,7 に Case2, 図-9,11 に Case4 について代表的な浮遊運動をする粒子の運動とその縦断位置における鉛直方向流速を示す。また、図-6,8,10,12はそれぞれの粒子の鉛直方向速度の時系列変化である。

粗度要素間隔に関わらず、浮遊する粒子には、側壁沿いを水面近傍まで上昇し、その後水路中央に輸送されながら下降していくもの(粒子 B, 粒子 D)と、水路中央付近を上昇するが、水面までは到達しないもの(粒子 A, 粒子 C)の2種類の粒子が見られた。

Case2 に比べ Case4 は、粒子の沈降速度の4倍以上の強い上昇流塊が広範囲かつ高頻度で発生している。そのため、Case4 の粒子は Case2 の粒子に比べ上昇速度が大きく、特に粒子 C は粒子の沈降速度の6倍以上の大きさの鉛直方向速度を持つ。

これは、粗度の間隔の広い水路では、狭い水路に比べ、流れが勢いよく粗度及び底面に衝突し、強い鉛直上向き流れが発生するためである。

5. 結論

本研究により、底面粗度間隔の違いにより発生する流れの三次元構造の差異、粗度と流れが浮遊粒子の運動に及ぼす影響を明らかにした。今後は粒子濃度を増加させた実験を行い、粒子を浮遊させる流体塊の特性、粒子と流体の相互作用を明らかにする。

参考文献

- 1) 溝口敦子：土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_1129-I_1134, 2020. 2) 関根ら：土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 77, No.2, I_691-I_696, 2021. 3) Fukuoka et al. : Advances in Water Resources , vol.72, pp.84-96, 2014. 4) 禰津家久：土木学会論文報告集, vol.261, pp.67-76, 1977. 5) 福島ら：土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No.2, I_607-I_612, 2022.

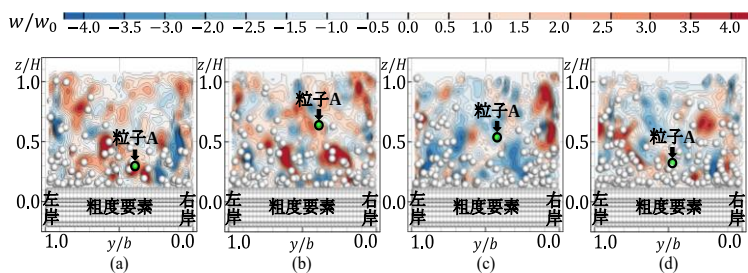


図-5 粒子 A の運動(Case2)

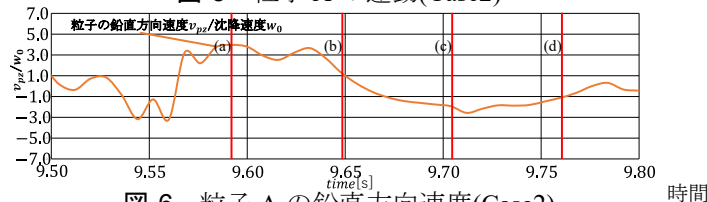


図-6 粒子 A の鉛直方向速度(Case2)

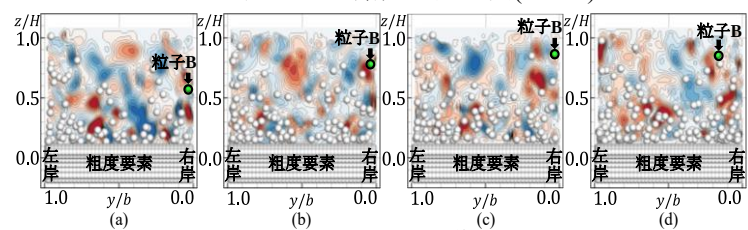


図-7 粒子 B の運動(Case2)

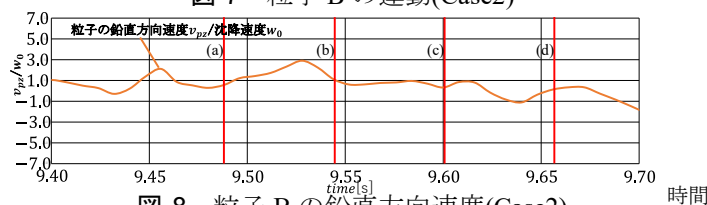


図-8 粒子 B の鉛直方向速度(Case2)

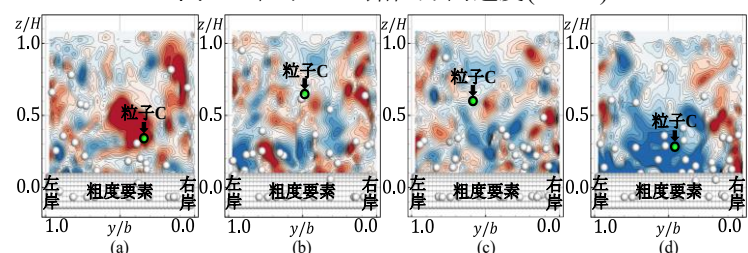


図-9 粒子 C の運動(Case4)

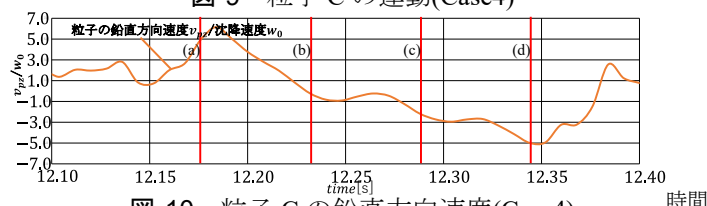


図-10 粒子 C の鉛直方向速度(Case4)

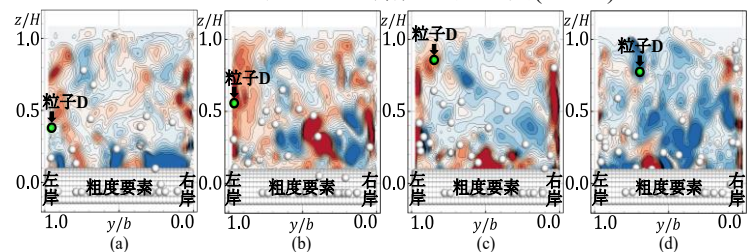


図-11 粒子 D の運動(Case4)

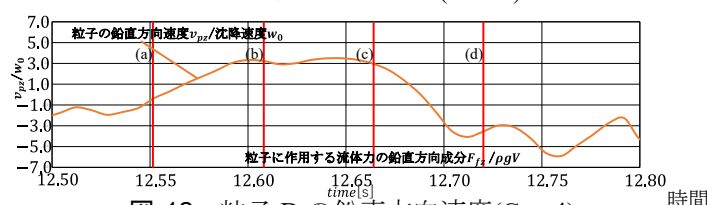


図-12 粒子 D の鉛直方向速度(Case4)