

# 狭い幅で異なる底面粗度を有する開水路における三次元流れと浮遊する粒子の時間平均構造に関する研究

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 フェロー 福岡 捷二  
 中央大学研究開発機構 正会員 高鉄 裕也

## 1. 序論

開水路の底面粗度の違いによる三次元乱流構造と浮遊砂の運動機構の関係の解明は、移動床の水理学をより深く理解するための基礎である。乱流中の流砂の運動機構について、溝口<sup>1)</sup>や関根ら<sup>2)</sup>は、幅の広い開水路粗面乱流中の流れと流砂運動をそれぞれPIV解析と高速度カメラで計測し、流砂運動と周囲流体の運動を分析し有用な結果を得ている。しかし、実験解析には限界があり、流砂運動に及ぼす時間平均流及び乱流構造の関係、これらに及ぼす水路のアスペクト比、粗度条件については十分明らかになっていない。

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を配置した開水路粗面乱流において、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<sup>3)</sup>を行い、平均流や乱流と粒子運動の関係を明らかにし、土砂水理学の理解につなげることを目的とする。

## 2. 数値解析手法と実験条件

図-1に示すように、実験では、長さ1.5m、幅0.02m、勾配1/20の一般的な直線水路に、定常流(0.171 l/s)を供給した。座標軸は、流れ方向にx軸、横断方向にy軸、垂直上向き方向にz軸をとる。実験は、全部で4ケース行った。Case1及びCase3は粒子を投入しないclear flowであり、直径 $d_r=8\text{mm}$ の円柱粗度要素が密( $l=0.2\text{mm}$ )と疎( $l=24\text{mm}$ )に敷き並べられた水路を用いた。Case2及びCase4では、それぞれCase1及びCase3と同様の実験水路を用い、アクリルを想定した比重1.2で直径 $d=1\text{mm}$ の球形粒子群を $0.20\text{m} \leq x \leq 0.60\text{m}$ の範囲にランダムに投入した(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、禰津ら<sup>4)</sup>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。

本解析はAPM法<sup>3)</sup>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に水理量と解析パラメータを示す。

## 3. 流れの時間平均構造

本章では、clear flowのCase1及びCase3の時間平均流構造について分析する。図-2, 3, 4に、Case1とCase3の水路中央( $y/b=1/2$ )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

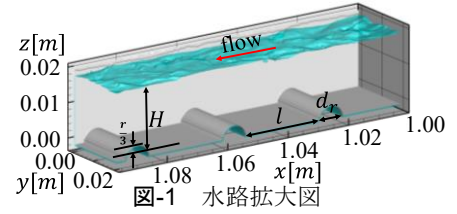


表-1 水理量

	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	-	60	-	-	-
$Fr (= U_{mean}/\sqrt{gR})$ : フルード数	2.56	2.58	1.75	1.75	-

表-2 解析パラメータ

流体計算格子サイズ( $\Delta$ )	0.00025	m
粒径と流体計算格子幅の比( $d/\Delta$ )	4	-
計算格子幅とサブセル幅の比( $\Delta/\Delta_{subcell}$ )	6	-
流体運動解析の刻み時間	$2.0 \times 10^{-5}$	s
粒子運動解析の刻み時間	$2.0 \times 10^{-7}$	s
水の密度	1000	kg/m <sup>3</sup>
粒子の密度	1200	kg/m <sup>3</sup>
Smagorinsky定数	0.173	-
縦弾性係数	$2.0 \times 10^4$	kg/cm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.388	-
反発係数	0.5	-
摩擦係数	0.38	-

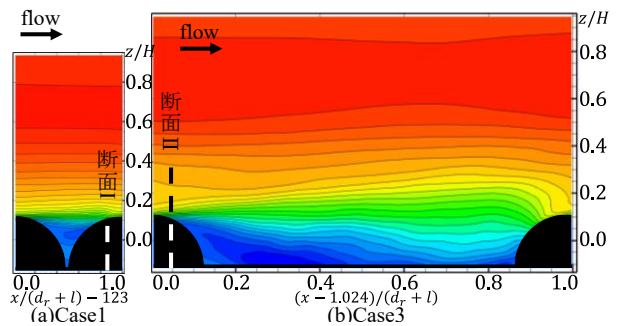


図-2 主流速の縦断面分布

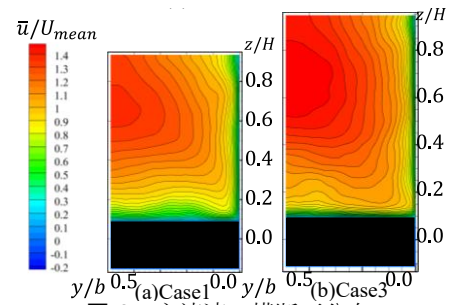


図-3 主流速の横断面分布

図-2(a)に示すように、粗度要素キーワード 粗面開水路, 乱流, 流砂

間隔の狭い流れの Case1 では、粗度要素の影響は、粗度要素近傍( $z/H \leq 0.2$ )の主流速分布に歪みを生じさせるが、これより高い位置の流体に及ぼす影響は小さく、 $z/H \geq 0.2$  の主流速分布の縦断的な変化は小さい。一方、粗度要素間隔の広い流れの Case3 では、図-2(b)、3(b)に示すように、粗度要素の後流域における渦層の発達、縦断方向、鉛直方向への主流速分布への影響は大きい。

また、図-4 に示すように、Case3 は Case1 に比べ、強い二次流が広い範囲において発生しており、断面平均流速に対する二次流速の最大値  $|sv_{max}|/U_{mean}$  は、Case1 では 2 割弱、Case3 では 6 割程度となった。これら二次流より、図-3 に示すように、主流速の最大値が水面下に現れる velocity dip 現象が発生し、主流速分布は歪む。

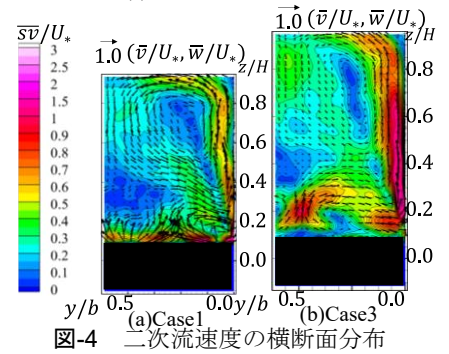


図-4 二次流速の横断面分布

4. 鉛直方向流速場と粒子の運動

本章では、Case2 及び Case4 において水路中央付近で浮遊運動をする粒子を選び、粒子運動及び周囲の流体塊の鉛直方向流速と粒子運動を分析する。図-5、7 はそれぞれ 0.032 秒、0.048 秒ごとの粒子 A(Case2)及び粒子 B(Case4)の縦断位置における横断面内の無次元鉛直方向流速を示し、図-6、8 は粒子 A、粒子 B の縦断的な鉛直運動を示す。

図-5、7 に示すように、水路中央付近では、強い上昇流が発生する場合や、強い下降流が発生する場合など、幅広い鉛直方向流速を持つことが確認できる。また、Case2 に比べ、Case4 では、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。さらに、図-6、8 に示すように、粒子 A は比較的緩やかに上昇し、水深の 6 割程度までしか到達しないのに対し、図-8 に示すように、粒子 B は急激に上昇し、水深の 8 割まで到達する。

これらは、粗度要素縦断間隔の広い水路では、縦断間隔の狭い水路に比べ、流れが勢よく底面、粗度要素に衝突し、強い鉛直上向き流れが発生するためである。

5. 結論

本研究から、開水路底面の粗度要素の違いが、乱流の三次元構造と浮遊砂の運動機構にどのように影響するかが見えてきた。この研究を、河床波による三次元流れと浮遊砂の舞い上がりに関係づけることを考えている。

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) 関根正人ら, 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: 土木学会論文報告集, vol.261, pp.67-76, 1997.

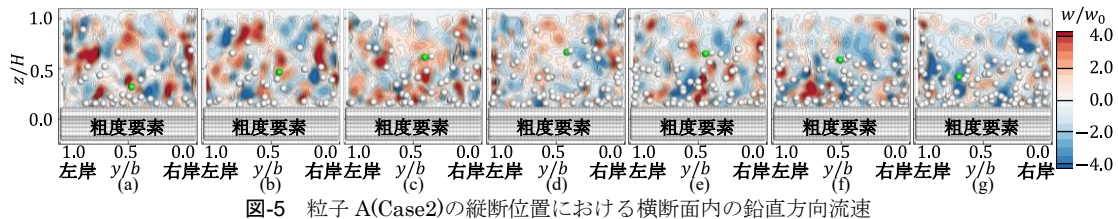


図-5 粒子 A(Case2)の縦断位置における横断面内の鉛直方向流速

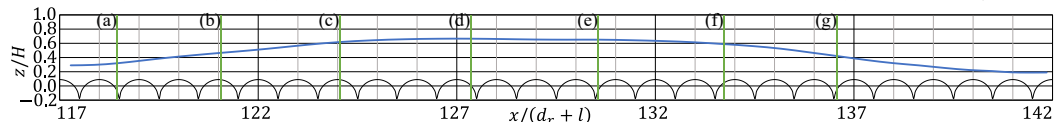


図-6 粒子 A(Case2)の縦断的な鉛直運動

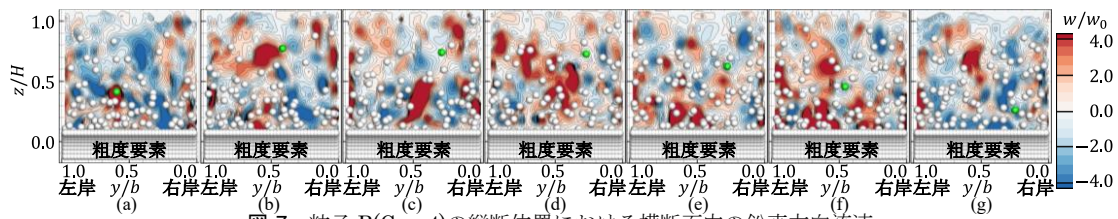


図-7 粒子 B(Case4)の縦断位置における横断面内の鉛直方向流速

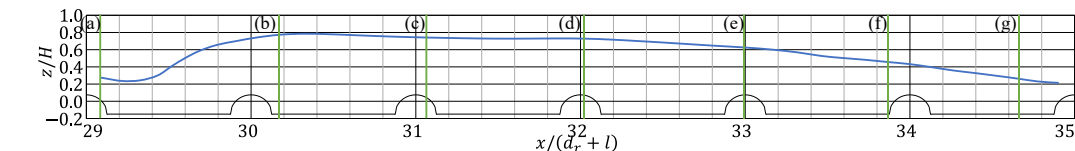


図-8 粒子 B(Case4)の縦断的な鉛直運動