

二次流が卓越する粗面開水路乱流場における流れと浮遊砂の三次元構造に関する研究

A study on three-dimensional structure of flow and suspended load in a rough open channel turbulent field dominated by secondary flow

都市環境学専攻 22N3100052K 福島 千乃

Yukino FUKUSHIMA

Key Words : secondary flow, suspended load, turbulent flow structure

1. 序論

洪水流による土砂の輸送量は河道地形の形成や河川環境に大きな影響を与えるため、水路境界形状に応じた流れや乱れの構造、浮遊砂の運動の機構を適切に評価する必要がある。このため、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。

既往の研究から、水路側壁近傍や底面近傍ではプラントルの第二種二次流が形成され、これにより主流速分布が歪むこと等が示されているが、粗度要素の存在により強い二次流が形成される場の乱れ構造は未解明な点が多い。また、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。しかし、流砂運動が流れの時間平均構造及び乱流構造に及ぼす影響や、流れが流砂運動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し、アスペクト比が小さく底面に粗度要素が配置された水路において、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¹⁾を行い、流れと浮遊砂の三次元構造を明らかにすることを目的とする。

2. 数値実験概要¹⁾

図-1 に示すように、数値実験では、長さ 1.5m、幅 0.02m、勾配 1/20 の一様な直線水路に直径 8mm の円柱粗度を配置し、定常流(0.0171 l/s)を供給した。実験は 3 ケース行い、粒子の混入しない流れを Case1、Case1 に直径 1mm、比重 1.2 の球形粒子群を投入したものを Case2、Case3 とした。Case2、Case3 の供給粒子量はそれぞれ $9.8 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{s}$ 、 $4.7 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ である。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、流れに追随するようにした。乱流のサンプリング数は禰津²⁾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 3s とした。

本研究は Arbitrary Particle Multipase(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。水理量、解析パラメータについては、著者らの既往研

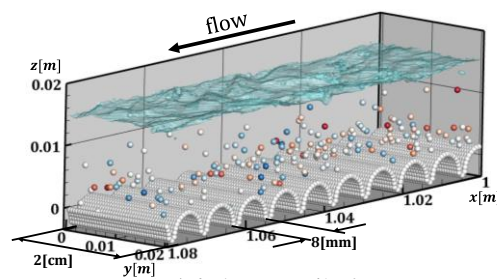


図-1 水路実験イメージ拡大図(case3)

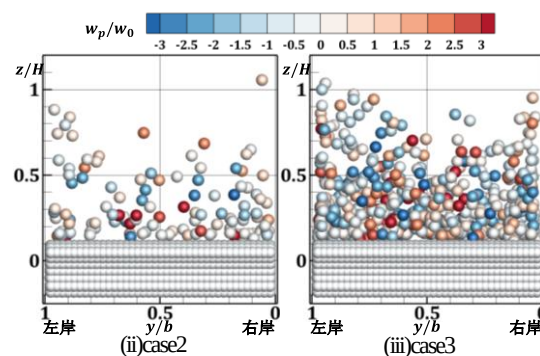


図-2 粒子の横断位置

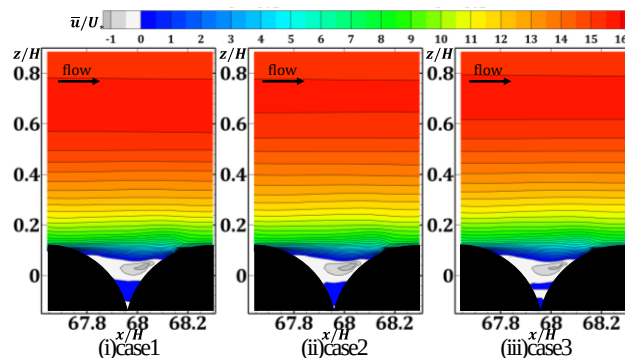


図-3 主流速の縦断面分布

究³⁾に示す。

3. 数値実験結果

(1) 粒子の運動と流れの時間平均構造

図-2 に case2 及び case3 におけるある瞬間の粒子の横断位置を示す。粒子は $0.9[\text{m}] < x < 1.2[\text{m}]$ の間にあるもののみを示し、粒子の色は、粒子の鉛直方向速度を示す。供給流砂量に関わらず、水路側壁近傍に存在する粒子は側壁沿いを上昇し水面近傍まで到達するのに対し、水

路中央近傍に存在する粒子は、水面近傍までは到達しない。このように、粒子は後述する二次流の影響を大きく受け、運動している。

図-3、4、5 に水路中心断面における主流速の縦断面分布、粗度谷部断面における主流速及び二次流速の横断面分布を示す。粒子の有無に関わらず、主流速の横断面分布と二次流速の横断面分布の基本的な構造は変わらない。粗度要素と粗度要素の間の領域では、流速が非常小さいことから、粗度頂部以下の領域が死水域化し、滑面のような流れ構造になっており、その結果、主流速分布の縦断的な変化は小さい。底面コーナーから側壁沿いを上昇する二次流である Outer Secondary Flow(OSF)や底面コーナーから水路中央に向かって進む Bottom Secondary Flow(BSF)が発生し、主流速分布は歪む。さらに、OSF が側壁付近の遅い運動量を水路中央の水面付近に運ぶため、最大主流速が水面下に発生する velocity dip 現象が発生する。

粒子投入前後で二次流速の大きさを比較する。粒子を投入した流れは粒子を投入しない流れに比べ、特に、側壁沿いを上昇する OSF や底面コーナーに向かう流れが小さくなっている。また、Case1 の最大主流速 $\bar{u}_{max}$ に対する二次流速の最大値 $|\bar{v}_{max}|/\bar{u}_{max}$ は 0.138 であったのに対し、Case2 は 0.129、Case3 は 0.119 と減少する。これと対応して、粒子投入前後で主流速分布の歪みが減少する。

(2) 流速と粒子の速度

図-6 に側壁のごく近傍の $y/b=0/20 \sim 1/20$ の領域で空間平均した粒子速度及び $y/b=1/40$ における横断方向流速と鉛

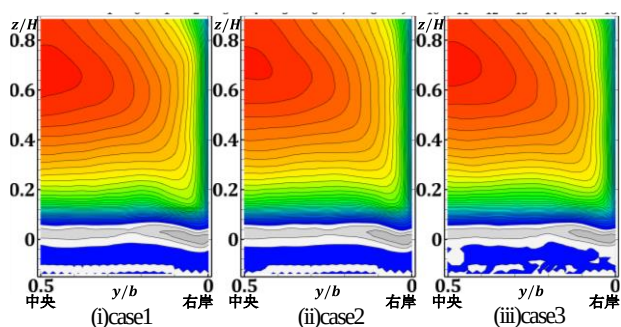


図-4 主流速の横断面分布

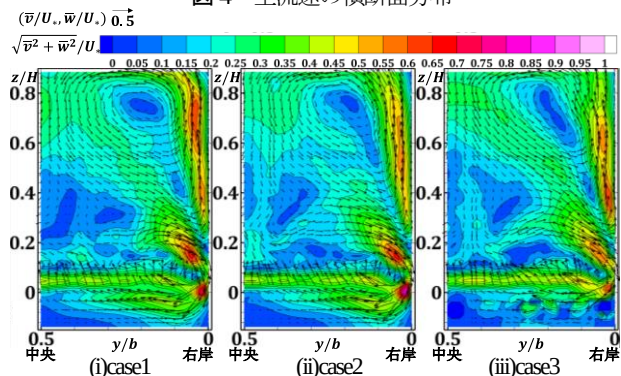


図-5 二次流速の横断面分布

直方向流速の鉛直分布を示す。

前節で示すように、Case1、Case2、Case3の横断方向流速と鉛直方向流速の基本的な構造は変わらない。また、Case2、Case3の粒子速度の基本的な構造も変わらない。

粒子速度と流速を比較する。 $z/H=0.1$ 以上の領域において、鉛直方向流速は粒子速度に比べ大きい。 $z/H=0.1$ 以下の領域においては、鉛直方向流速は粒子速度に比べ小さい。これは、 $z/H=0.1$ 以下の領域の粒子は、粗度要素に衝突し、粗度谷部に落ち込むものが多いためであると考えられる。

4. 結論

本研究では、アスペクト比が小さく粗度要素の存在により強い二次流が発生する場合における粒子の運動、流れと浮遊砂の構造を明らかにした。

今後は粒子比重を変え、粒子と流体の相互作用に着目し検討する。

参考文献

- 1)Fukuoka et al. : Advances in Water Resources , vol.72, pp.84-96 , 2014. 2)禰津家久 : 土木学会論文報告集, vol.261, pp.67-76, 1977. 3)福島ら : 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No.2, I_607-I_612, 2022.

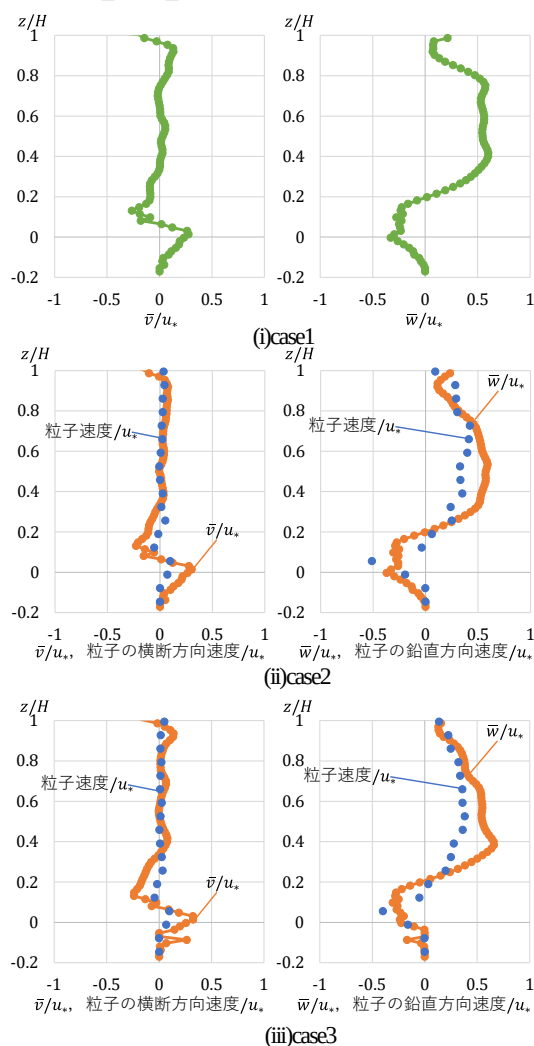


図-6 流速及び粒子速度の鉛直分布