

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と二次流と乱れの構造に及ぼす影響

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 フェロー 福岡 捷二
中央大学研究開発機構 正会員 高楯 裕也

1. 序論

河道の断面形や粗度に起因するプラントルの第二種二次流と乱れの構造を理解することは、浮遊砂の輸送にとって重要である。本研究では、プラントルの第二種二次流が発達する開水路粗面乱流中の浮遊砂運動に関する詳細な数値計算を行い、乱流中の浮遊砂の運動が二次流や乱れの構造に与える機構を明らかにする。

2. 数値実験概要

実験では、APM法¹⁾を用い、**図-1**に示すような底面に直径 $d_r=8\text{mm}$ の円柱粗度を敷き詰めた長さ1.5m、幅0.02m、勾配1/20の直線水路に定常流0.171 l/sを供給し、 $0.2\text{m} \leq x \leq 0.6\text{m}$ の範囲に直径 $d_s=1\text{mm}$ 、比重1.2の球形粒子群を投入した(流砂量 $9.38 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$)。上流端には、粗度要素の20倍と十分離れた位置の流速を毎ステップ与え、境界層が発達する距離を短くした。下流端には、一つ上流側のメッシュの流速を与え、水深を制御した。粒子の初速度には、粒子の中心座標から一番近い流速評価点の値を与え、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の手法²⁾にならぬ $4.0 \times 10^4\text{s}$ ごとに計測し、平均時間は1sとした。**表-1,2**に水理量、解析パラメータを示す。

3. 粒子の運動と流れ構造の変化

図-2に粒子投入前後の二次流速の横断面分布図を示す。断面は、粗度頂部に近い粗度要素前面部におけるものである。粒子投入前の流れ(**図-2(a)**)に着目すると、二次流はレイノルズ応力勾配と圧力勾配の不均衡に起因して発生し、底面コーナーから側壁沿いを進むouter secondary flow (OSF)や粗度要素を乗り越える流れ³⁾から成っている。このような流れに粒子を投入し、粒子運動及び二次流速の変化を観察する。

図-3はある瞬間の粒子の横断位置を示す。図中の粒子の色は、粒子周りの流体の鉛直方向流速 w をRubeyの式より算出した粒子の沈降速度 w_0 (0.03 m/s)で無次元化したものを表している。側壁付近にある粒子は、**図-2(a)**に示すOSFの作用により水面付近まで上昇する。一方、水路中央付近の粒子は、粗度要素を乗り越える流れによって上昇しても、OSFの下降流の作用によって水面付近までは到達しない。

粒子投入後の流れ(**図-2(b)**)に着目する。粒子を投入したことにより、側壁沿いの上昇流と粗度要素を乗り越える流れが小さくなったのが確認で

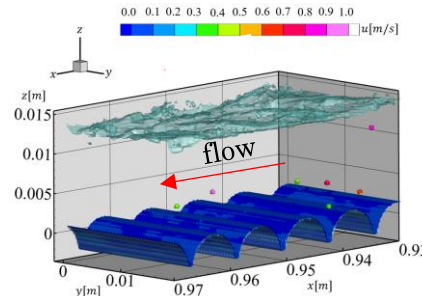


図-1 水路拡大図(側壁を非表示)

表-1 水理量

R	5.61	mm
h	12.8	mm
b/h	1.56	-
h/r	3.2	-
\bar{u}_{max}	0.975	m/s
U_{mean}	0.664	m/s
\sqrt{gRl}	0.052	m/s

表-2 解析パラメータ

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
ポアソン比	0.388	-
反発係数	0.5	-
摩擦係数	0.38	-

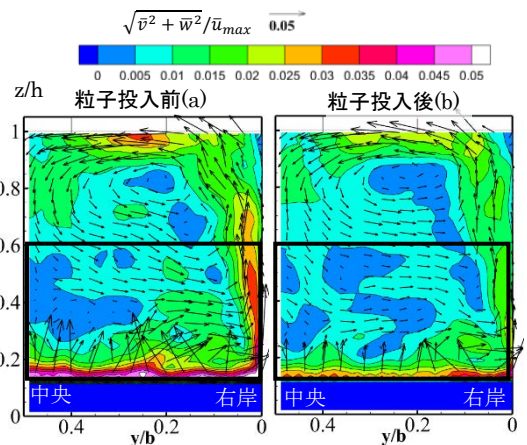


図-2 二次流速の横断面分布

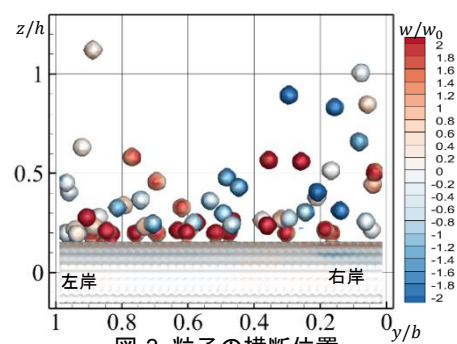


図-3 粒子の横断位置

キーワード 二次流, 浮遊砂, 乱流構造

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

きる。この機構を、二次流の発生機構から、鉛直方向のレイノルズ方程式(1)とレイノルズ応力の輸送方程式(2)を用いて考察する。ここに、 $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ である。

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} = -\frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial R_{ij}}{\partial x} = -R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(-\frac{1}{\rho} \overline{u'_i p'} \delta_{jk} \right) \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_k} \left(-\frac{1}{\rho} \overline{u'_j p'} \delta_{ik} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(-\overline{u'_i u'_j u'_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} \right)$$

図-4, 5 及び 6 に図-3 の黒枠領域における圧力歪相関項、 $-\rho \overline{w'w'}$ 及び圧力の横断面分布図を示す。図-5, 図-6 のベクトルはそれぞれ、レイノルズ方程式のレイノルズ垂直応力項を無次元化したものと、レイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和を無次元化したものである。粒子投入前の流れに着目すると、水路側壁及び底面付近にて \bar{u} が急激に減衰し流速勾配が発生するのに伴い、式(2)の右辺第 1, 2 項に示す生成項により $-\rho \overline{u'u'}$ が生成される³⁾。主流方向の変動成分 u' は、流速変動の連続条件に基づき圧力歪相関項(式(2)右辺第 3 項)を介し、横断方向と鉛直方向の乱れ成分(v' , w')に分配され(図-4(a)・(b))、側壁や底面付近において強い $-\rho \overline{w'w'}$ が生成される(図-5(a))。

一方、粒子を投入した流れは粒子投入前の流れに比べ、底面付近と側壁沿いで $\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \right)$ の強度が小さい(図-4(c))。したがって、粒子を投入することで u' が生成されづらくなり、これが流速変動の圧力歪相関項を介し、横断方向と鉛直方向の乱れ成分に分配されても(図-4(c)・(d))、側壁や底面付近において粒子投入前の流れほど強い $-\rho \overline{w'w'}$ を生成するには至らなかったと考えられる(図-5(b))。

粒子投入前後で、レイノルズ垂直応力項、及び圧力勾配項の大きさを比較する。上記の機構に伴い、粒子投入後の流れは粒子投入前の流れに比べ、底面コーナーから側壁沿いを進む OSF の成分を抑制するレイノルズ垂直応力勾配が減少する(図-5)。また、これに対応し、底面コーナーから側壁沿いを進む OSF の成分を駆動する圧力勾配項も減少する(図-6)。したがって、レイノルズ方程式の応力勾配が減少し、二次流速の大きさも減少したと考えられる。

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。これにより、浮遊砂の密度の大きさ、粒子の大きさ、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、これらについての定量的な考察を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) 禰津 : 土木学会論文報告集, vol.261, pp.67-76, 1977. 3) 高 鉄, 福岡 : 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_1087-I_1092, 2020.

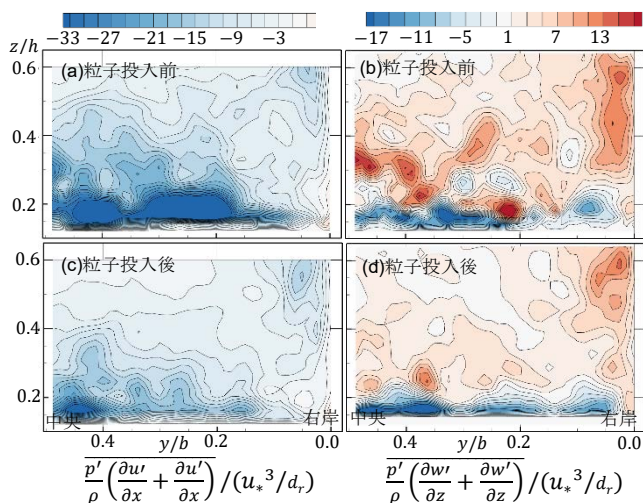


図-4 圧力歪相関項の横断面分布図

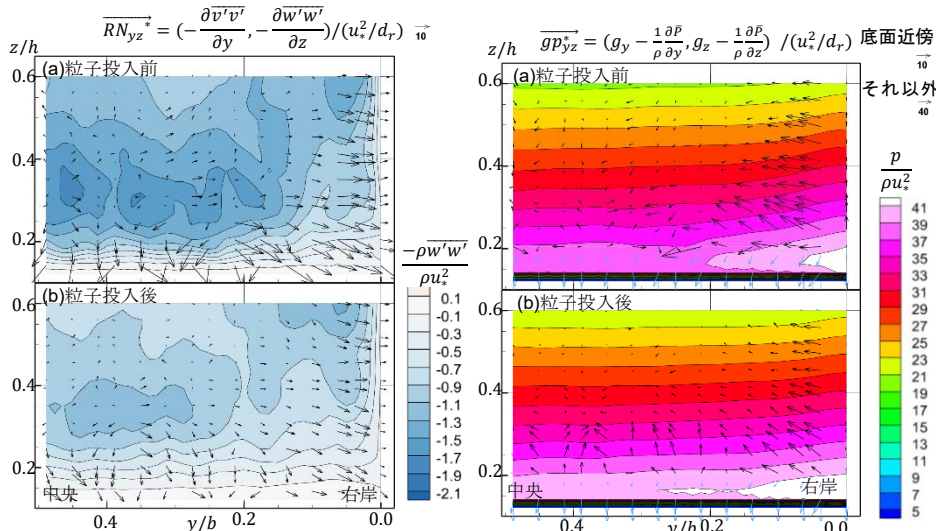


図-5 $-\rho \overline{w'w'}/\rho u_*^2$ の横断面分布図

図-6 圧力の横断面分布図