

粗面開水路の二次流の維持機構と二次流のスケールに及ぼすアスペクト比と相対水深の効果

高 敏 裕也¹・福岡 捷二²

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a18.ntwb@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学 研究開発機構 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

アスペクト比($b/h = 0.36 \sim 1.38$)と相対水深($h/r = 3.63 \sim 12.00$)の異なる開水路粗面乱流の数値実験を実施した。粗面開水路では、粗度要素を乗り越える流れが隣接する粗度要素に衝突し、粗度要素の前面で圧力が増加する。レイノルズ方程式の重力加速度と圧力勾配項の和は、粗度要素の前面の谷底に近い断面では谷部に向けて働き、潜り込む流れを駆動し、粗度要素前面の粗度頂部に近い断面では上向きに力を及ぼし、粗度要素を乗り越える流れを駆動する。これら鉛直方向流れと outer secondary flow や bottom secondary flow が重なり合うことにより、二次流は縦横断的に変化する。

Key Words: secondary flows, aspect ratio, relative depth on the roughness height, pressure gradient

1. 序論

開水路粗面乱流の構造に及ぼす水路のアスペクト比 (b/h : 水路幅, h : 水深) と相対水深 (h/r : 底面粗度の高さ) の効果を明らかにすることは、多くの水理現象にとって基礎的かつ重要な課題である。

矩形断面を有する滑面直線開水路では、水路内側から底面コーナーに向かい、底面コーナーから底面沿いを水路中央に向けて進む bottom secondary flow (以下、BSF と呼ぶ)、底面コーナーから側壁を上昇する outer secondary flow (OSF)、水面と側壁に囲まれたコーナーにおいて OSF とは逆向きに回転する inner secondary flow (ISF) の 3 種類の二次流セルが発生することが知られている。二次流速の大きさの最大値 $|sv_{max}|$ は、最大主流速 \bar{u}_{max} の

0.015 ~ 0.03 倍と小さいが、二次流は主流速分布を歪ませるなど流れ構造や河床構造に及ぼす影響は大きい¹⁾。

林ら²⁾は、開水路滑面乱流の数値実験を行い、図-1 に示すように、レイノルズ垂直応力項は水路の内側から側壁や水路底面に向かって作用し、全体的に OSF や BSF の底面コーナーに向かう成分を駆動すること、レイノルズ垂直応力に対応する圧力の勾配項はレイノルズ垂直応力項とは逆向きに働き、OSF の側壁沿いを進む成分や BSF の水路中央に向かう成分を駆動することを示している。

富永³⁾は、潤辺の粗度とアスペクト比 ($b/h = 2.00 \sim 8.00$)、相対水深 ($h/r = 6.67 \sim 26.3$) の異なる開水路粗面乱流の構造を分析し、開水路滑面乱流に比べ、開水路粗面乱流の二次流速が大きくなること ($|sv_{max}|/\bar{u}_{max} = 0.03 \sim 0.04$) を示している。また、側壁のみ粗面のケースでは、他の条件と比べて、二次流セルが横断方向に拡大しており、二次流のスケールに及ぼす粗度の効果を議論する上で興味深い結果を得ている。

Ancey ら⁴⁾は、極端に幅の狭く、また粗度の大きい粗面開水路流中の粒子の跳躍運動に着目し研究している。しかし、流れの詳細な構造に関する記述は少ない。

このように、開水路滑面乱流の二次流と応力に関する理解に比して、開水路粗面乱流で強い二次流が維持される機構や特に幅の狭い水路の二次流構造に及ぼすアスペクト比や相対水深の効果に関する理解は不足している。

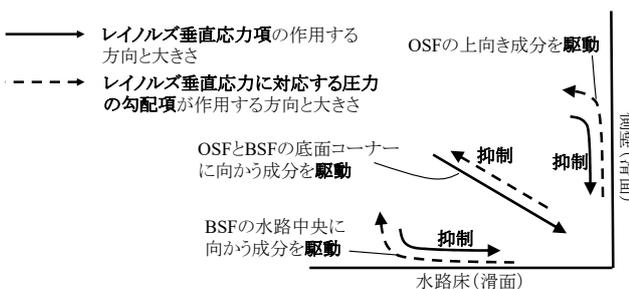


図-1 滑面開水路の底面近傍におけるレイノルズ垂直応力項とそれに起因する圧力勾配項の作用する向き (林ら²⁾を参考に作成)

表-1 水理条件

	Q	b	Q/b×10 ³	R	h	b	b/h	r	h/r	\bar{u}_{max}	U_{mean}	$U_*(R)$	f	Re	Fr	sv _{max}	sv _{max} / \bar{u}_{max}	velocity-dip の有無	ISFの 有無
	[l/s]	[mm]	[m ² /s]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[-]		
ケース1	0.060	7	8.57	2.97	19.5	7	0.36	4.0	4.88	0.68	0.44	0.038	0.157	1.3E+03	2.58	0.043	0.063	×	○
ケース2	0.111	13	8.54	4.68	16.7	13	0.78	4.0	4.18	0.78	0.51	0.048	0.183	2.4E+03	2.39	0.070	0.090	○	△
ケース3	0.171	20	8.55	5.92	14.5	20	1.38	4.0	3.63	0.88	0.59	0.054	0.174	3.5E+03	2.45	0.070	0.080	○	×
ケース4	0.060	7	8.57	2.93	18.0	7	0.39	1.5	12.00	0.68	0.48	0.038	0.132	1.4E+03	2.81	0.030	0.044	×	○

ここに、Q:流量, b:水路幅, Q/b:単位幅流量, R:径深, h:水深, b/h:アスペクト比, r:円柱半径, h/r:相対水深, \bar{u}_{max} :主流速の最大値, U_{mean} :断面平均流速, $U_*(R)$:径深を用いた摩擦速度, Re:断面平均流速と径深に基づくレイノルズ数, Fr:断面平均流速と径深に基づくフルード数, |sv_{max}|:二次流速の大きさの最大値, |sv_{max}|/ \bar{u}_{max} :最大主流速に対する二次流速の大きさの最大値である。

著者らは、開水路粗面乱流における流れと粒子運動の相互作用を説明できる解析モデルの開発とその機構の解明を明らかにすることを目指している。このため、Ancy らの実験に倣い、開水路粗面乱流の三次元数値実験を実施し、粗面開水路の底面近傍における時間平均流の三次元構造の検討を進めている⁹⁾。本研究では、第一に、二次流の維持に密接に関係するレイノルズ応力の生成機構及び応力の三次元構造と二次流の維持機構の関係を示す。第二に、二次流のスケール及び主流構造に及ぼすアスペクト比と相対水深の効果を示し、幅の狭い粗面開水路の流れ構造に関する基礎的理解を深める。

2. 数値実験手法と解析法

(1) 数値実験手法

単位幅流量の等しい条件のもと、アスペクト比(b/h = 0.36~1.38)と相対水深(h/r = 3.63~12.00)の異なる4ケースの数値実験を実施した(表-1)。ケース1では、Ancy らの実験⁹⁾と同様に、長さ2 m、幅7 mm、勾配1/20の様な直線水路に一定流量(0.060 l/s)を供給した。図-2の水路拡大図に示すように、水路底面には直径2r = 8 mmの円柱を一様に敷き詰めた。ケース2と3はケース1と比べ水路幅を大きくし、ケース4はケース1と同じ水路幅で底面粗度を小さくした(2r = 3 mm)。

上流端(x = 0.0 m)には、径深Rの30倍以上また円柱粗度の直径2rの25倍以上と十分離れ、径深や円柱粗度により決まる大スケールの変動を捉えることのできるx = 0.2 mの流速分布を毎ステップで与え、境界層が発達する距離を短くした。下流端(x = 2.0 m)には1メッシュ上流側の流速分布を時々刻々と与え、下流端水深を制御した。

(2) 数値解析法

流れの解析はLESであり、SGS応力はSmagorinskyモデルにより評価した。壁乱流においてSmagorinsky定数Csは、通常、Deardorffの滑面平行平板間流れの解析結果⁹⁾を参考に、Cs = 0.100を用いる。しかし、建物周りの気流を対象とし、粗度要素よりも小さな計算格子を用いた粗面乱流の解析^{7,8)}では、Csは0.100よりも大きな値を用いて実験結果を説明している。著者ら⁹⁾は、本文と同ス

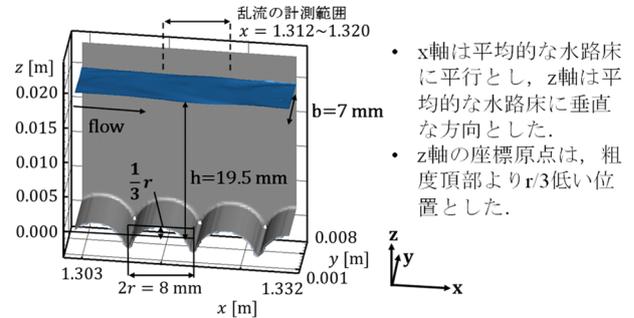


図-2 ケース1の水路拡大図(右岸壁を透明にしている)

ケールの相対水深で幅の広い開水路粗面乱流について、Cs = 0.173を用いて、水深スケールの流れ構造を説明している。この研究において、Cs = 0.100を用いると、実験結果と比べ流速がかなり大きくなった。本研究では、相対水深がh/r = 3.63~12.00と小さいことから、減衰関数を導入せず、Cs = 0.173を与えた。

時間発展及び圧力の収束はそれぞれSMAC法、SOR法により解いた。刻み時間はdt = 2.0 × 10⁻⁵ sとした。

水路境界の取扱いについて、本研究では、デカルト座標系の枠組みで流れに及ぼす固体の影響を容易に考慮することの可能な一流体モデルを用いて、no-slip条件を適用した。一流体モデルでは、計算格子内に含まれる固相の体積割合αを用いて格子内の混合流体の質量と運動量を評価する。本研究では、牛島ら¹⁰⁾に倣いサブセル法を用いてαを算定した。計算格子幅Δ及びサブセル幅Δ_{subcell}は、幅の広い開水路粗面乱流の著者らの解析結果⁹⁾に従い設定した(Δ = 0.3 mm ≤ 2r/10, Δ_{subcell} = 0.05 mm ≤ 2r/60)。

自由水面の変化は、計算格子内の水の体積割合fの輸送を解いて評価した(VOF法)。本研究では気相を解かず自由水面を計算境界とした。自由水面の境界条件は、Hirtらの手法¹¹⁾を参考に、水面で圧力及びせん断応力が0になるように、それぞれ水面を含む計算格子の圧力及び水面外部の流速を設定した。

(3) 乱流の計測と数値実験結果の妥当性の検証

乱流のデータは、上流端及び下流端から十分離れたx = 1.312 m(粗度頂部)から円柱粗度1個分の範囲にて、瀬津¹²⁾の手法に倣い、4.0 × 10⁻⁴ sごとに計測した。

乱流の計測時間を検討するため、最も変動の大きい主流速uについて、ケース3の粗度頂部断面の水路中央、z/h = 0.14における5秒間平均値を基準としたときに各時

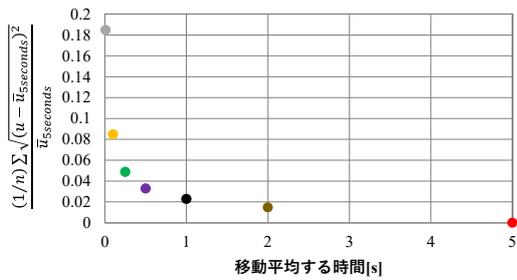


図-3 主流速 u の 5 秒間平均値を基準としたときの各移動平均値の標準偏差 (5 秒間平均値で無次元化)

間で移動平均した値がどの程度の誤差を有するか比較する (図-3) . 移動平均時間が 1 秒程度で 5 秒間平均値に漸近し, 誤差が 2%程度と小さくなる. 従って, 計測時間は 1 秒とした. なお, 2 秒間計測した場合と時間平均流の構造が変わらないことを確認している (ケース 3) .

本文では, 実験条件 (水路幅 7 mm, 勾配 1/20, 円柱粗度の半径 $r=4\text{mm}$ 及び単位幅流量 $Q/b=0.00857\text{m}^2/\text{s}$) と水量 (水深 $h=20\text{mm}$ と断面平均流速 $U_{\text{mean}}=0.43\text{m/s}$) が明確なケースを対象に, 同一条件のケース 1 において水深 $h=19.5\text{mm}$ と断面平均流速 $U_{\text{mean}}=0.44\text{m/s}$ とが Ancy からの結果を満たすことを確認した.

3. 開水路粗面乱流におけるレイノルズ応力の生成機構

二次流のスケールを議論するためには (第 5 章) , その維持機構に関わるレイノルズ垂直応力がどのように生成されるか, また生成機構に及ぼすアスペクト比や相対水深の効果を検討する必要がある. 第 3 章では, 粗度要素の影響が大きいケース 3 の結果を中心に, 式(1)のレイノルズ応力方程式から支配的な項を算出し, レイノルズ垂直応力の生成機構を検討する. なお, 乱れの統計量には LES で直接計算された成分のみを用い, 格子以下のスケールの乱れは含まない.

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

ここに, u_i はグリッドスケール(GS)の流速の i 方向成分 ($i, j, k=1\sim 3$), $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$: レイノルズ応力, p : 圧力と SGS 応力の等方成分の和, ρ : 密度 (1000kg/m^3), ν : 動粘性係数 ($1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$), δ_{ik} : デイラックのデルタ関数である. 上付きバーは時間平均, ダッシュは時間平均値からの変動分を表す.

図-4 に, R_{11} の主要な生成項の横断面分布を示す. 各

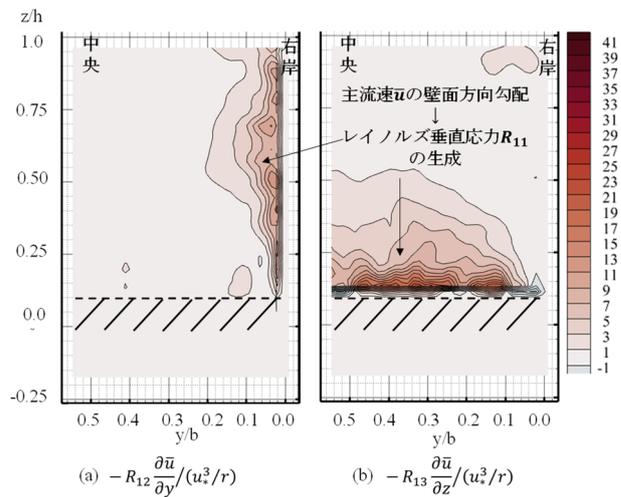
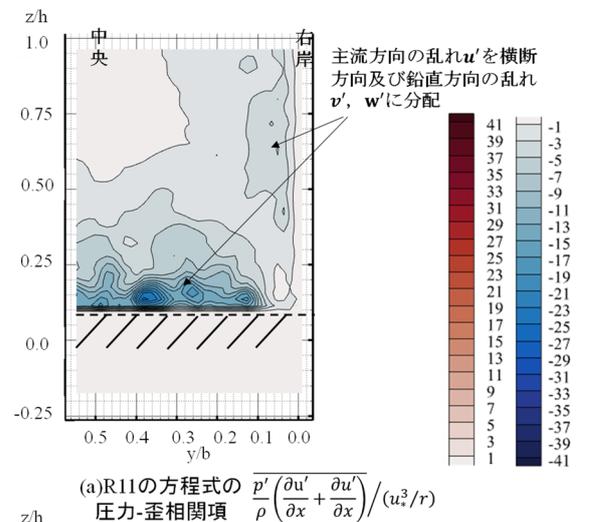
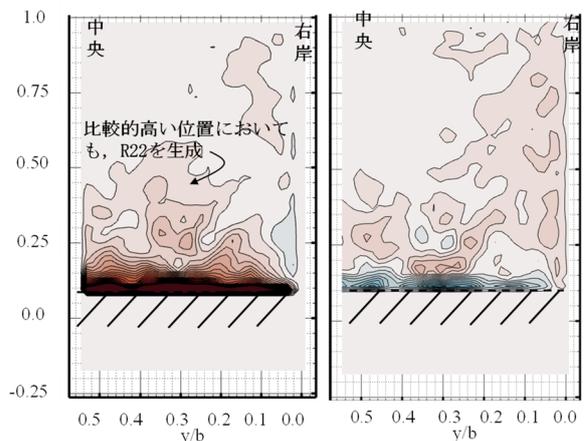


図-4 レイノルズ応力 R_{11} の生成項の横断面分布



(a) R_{11} の方程式の圧力-歪相関項 $\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \right) / (u^2/r)$



(b) R_{22} の方程式の圧力-歪相関項

(c) R_{33} の方程式の圧力-歪相関項

$$\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) / (u^2/r)$$

$$\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial w'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right) / (u^2/r)$$

図-5 圧力-ひずみ相関項の横断面分布

項は, 代表速度に摩擦速度 u_* , 代表長さに粗度高さ r を用いて無次元化している. 縦断位置は, 粗度要素を乗り越える流れが生ずる断面である (以下, 同じ断面とする). 詳細は第 4 章で示す. 主流速 u の壁面方向勾配に伴いレイノルズ応力 R_{11} が生成される. 粗度要素に主流

が衝突し乱れるため、 R_{11} は側壁付近と比べ底面付近で強く生成される。

図-5 に、 R_{11} , R_{22} 及び R_{33} の方程式における圧力-歪相関項 (式(1)の右辺第3項) の横断面分布を示す。ここで、圧力-歪相関項は、圧力変動を介して流速変動の各方向成分を分配し合うことを表す。これより、主流方向の乱れ成分が底面及び側壁付近で横断方向及び鉛直方向の乱れ成分に分配され、 R_{22} 及び R_{33} が生成される。

R_{22} の方程式の圧力-歪相関項は、ケース3では底面から $zh \approx 0.5$ の範囲で R_{22} を生成するのに対し (図-5(b))、アスペクト比の小さいケース1では、底面から $zh \approx 0.3$ の範囲と低い位置で R_{22} を生成することを確認した。従って、アスペクト比が極端に小さい場合、アスペクト比の大きいケースと比較して、水深に対するOSFのスケールは小さくなると考えられる。また、ケース1とアスペクト比は同程度で相対水深が大きいケース4では、底面粗度の効果は小さく、ケース1と比べOSFのスケールが小さくなると考えられる。

4. 開水路粗面乱流における底面近傍の応力の三次元構造と二次流の維持機構

(1) 底面近傍における応力の三次元構造と二次流の維持機構

粗度要素の影響が大きいケース3の結果を用いて、レイノルズ方程式から支配的な応力を算出し、その三次元構造を考察する。

図-6 に、レイノルズ垂直応力(R_{22} , R_{33})の横断面分布を示す。 \overline{RN}_{yz}^* はレイノルズ方程式のレイノルズ垂直応力項を u_*^2/r で無次元化したベクトルある。レイノルズ垂直応力(R_{22} , R_{33})の分布は、図-5(b),(c)の圧力-歪相関項の分布に対応し、それぞれ側壁及び底面に近づくにつれて減衰する。これより、レイノルズ垂直応力項 \overline{RN}_{yz}^* は、全体的に底面コーナーへ向けて作用し、OSF及びBSFの底面コーナーに向かう成分を駆動し、またOSFの底面コーナーから側壁沿いを上昇する成分やBSFの底面沿いを水路中央に向かう成分を抑制する。このように、開水路粗面乱流における二次流の駆動や抑制に及ぼすレイノルズ垂直応力の基本構造は、開水路滑面乱流²⁾に対応する。

次に、底面付近の圧力の横断面分布を検討する (図-7)。林ら²⁾はレイノルズ方程式の各項に対応するように圧力を分解しているが、本研究では圧力そのもので議論する。 \overline{gp}_{yz}^* はレイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和 (無次元量) である。なお、底面のごく近傍のベクトルは他と比べ1/10倍の大きさで表示している。圧力は、粗度頂部より高い位置では林らと同様に、水路の内側に向けて作用する。一方、粗度頂部付近では圧力

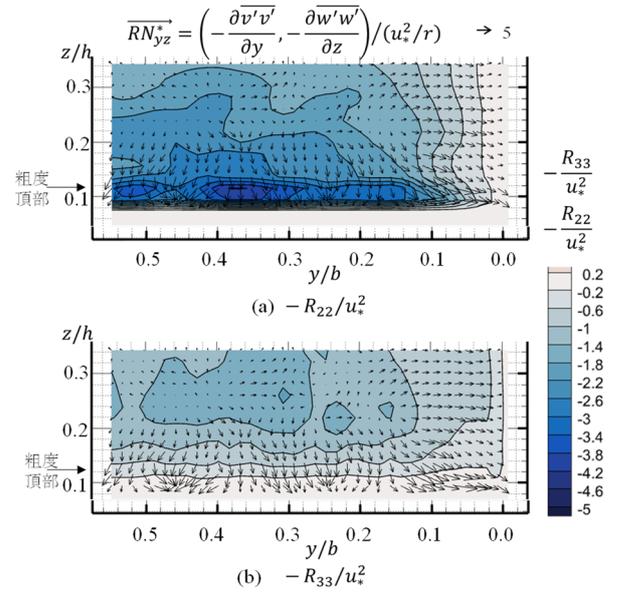


図-6 底面付近におけるレイノルズ垂直応力(R_{22} , R_{33})の横断面分布

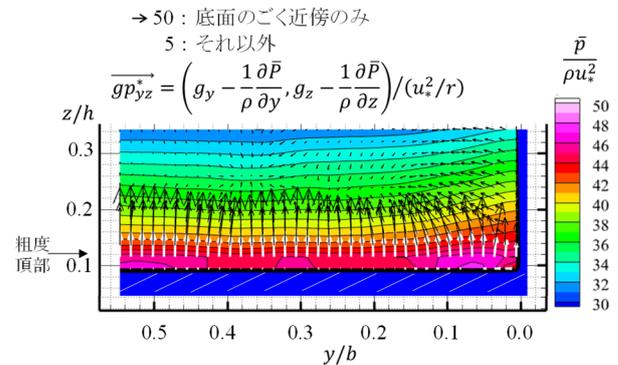


図-7 圧力の横断面分布

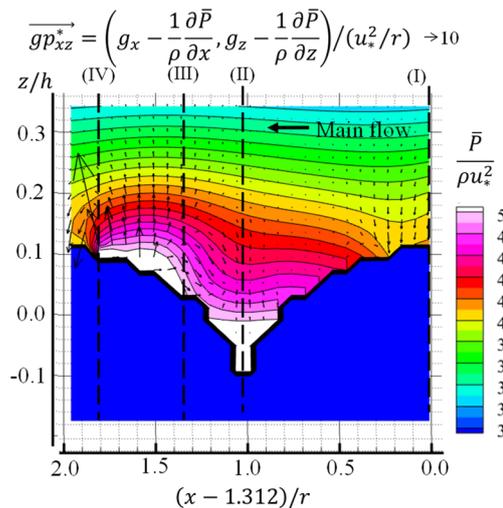


図-8 底面近傍($y/b=b/40$)における圧力の縦断面分布

がかなり大きくなり、 \overline{gp}_{yz}^* はレイノルズ垂直応力項 $[\overline{RN}_{yz}^*]$ の最大値の20~30倍の大きさで、水路底面から上向きに作用する。これは主流が粗度要素の前面に衝突するためと考えられる。

粗度の存在に伴う流れの縦断変化を評価する。図-8に、

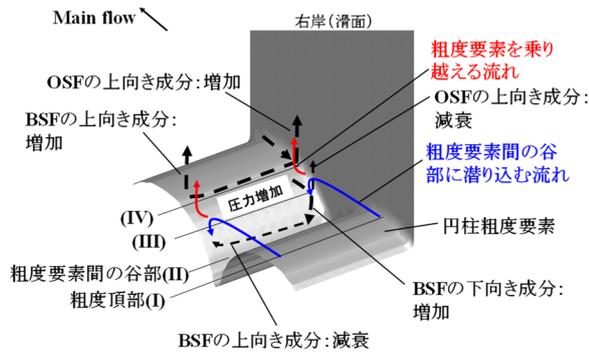


図-9 底面近傍における時間平均流の三次元構造の模式図

側壁近傍($y/b = b/40$)における圧力の縦断分布を示す。 $\overline{gp_{xz}^*}$ は、レイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和(無次元量)である。上流側の粗度要素を乗り越えた流れが衝突する下流側の粗度要素の前面(断面(III)と(IV)の間)で圧力が増加する。重力加速度と圧力勾配項の和 $\overline{gp_{xz}^*}$ は、断面(III)の低い位置では粗度要素間の谷部に向かって作用し、谷部に潜り込む流れを駆動する。一方、断面(IV)では、 $\overline{gp_{xz}^*}$ は鉛直上向きに働き、粗度要素を乗り越える流れを駆動する。

(2) 底面近傍における時間平均流の三次元構造⁵⁾

前節を踏まえた、粗面開水路の底面近傍における時間平均流の三次元構造の模式図を示す(図-9)。

上流側の粗度要素を乗り越えた流れは下流側の粗度要素に衝突し、粗度要素前面の圧力が増加する。断面(III)では、流体を下向きに押し、全体的に谷部に潜り込む流れを駆動する。また、断面(IV)では、流体を鉛直上向きに押し上げ、粗度要素を乗り越える流れを駆動する。これら鉛直方向流れと OSF や BSF が重なり合うことにより、二次流は縦横断的に変化する。特に、断面(III)では BSF の下向き成分が、断面(IV)では OSF 及び BSF の上向き成分が増加する。このため開水路粗面乱流では、最大主流速に対する二次流速の大きさの最大値 $|sv_{\max}|/\bar{u}_{\max}$ は滑面開水路と比べて大きくなる。各ケースの $|sv_{\max}|/\bar{u}_{\max}$ の値を表-1 にまとめた。相対水深が $h/r=12.00$ のケース 4 では $|sv_{\max}|/\bar{u}_{\max} = 0.043$ と相対水深が $h/r=6.67 \sim 263$ の富永³⁾の実験結果(0.03 ~ 0.04)と同程度である。

5. 二次流のスケールと主流構造に及ぼすアスペクト比 b/h と相対水深 h/r の効果

図-10 に、ケース 3 の二次流速と主流速の横断面分布を示す(粗度要素を乗り越える流れが発生する断面: 断面(IV))。本文で実施した 4 ケースの中で最もアスペクト比の大きいケース 3 では($b/h=1.38$)、最大主流速は水

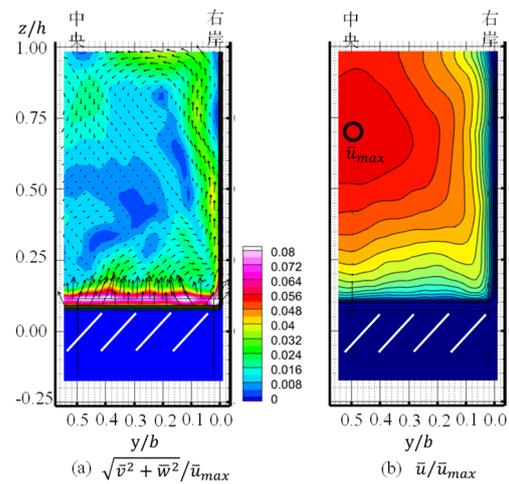


図-10 二次流速(a)及び主流速(b)の横断面分布(ケース 3: $b/h=1.38, h/r=3.63$, 断面(IV))

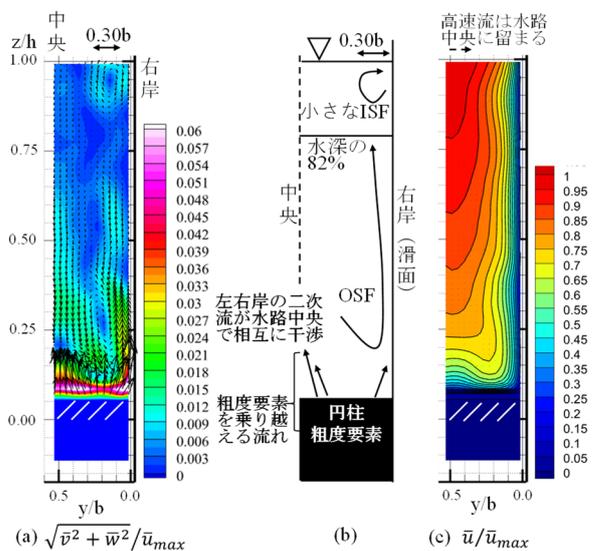


図-11 二次流速(a)、二次流の模式図(b)及び主流速(c)の横断面分布(ケース 1: $b/h=0.36, h/r=4.18$, 断面(IV))

面ではなく無次元水深 zh が 0.7 程度の高さに現れ、velocity-dip 現象⁷⁾を明瞭に捉えている。ただし、相対水深は $h/r=3.63$ とかなり小さく粗度要素前面の圧力が増加するため、断面(IV)では粗度要素を乗り越える流れが強く、BSF は消失し、左右岸の BSF の相互干渉は発生しない。また、OSF は側壁沿いを水面まで進むため、ISF は形成されない。

アスペクト比が極端に小さくなると(ケース 1, $b/h=0.36$)、断面(IV)においても左右岸の二次流が相互に干渉し、水路中央付近で強い上昇流が発生する。また、図-11(a), (b)に示すように、OSF は側壁沿いをそのまま上昇するが水面には到達しない(水深の 82%)。このため、最大主流速は水面に現れ、velocity-dip 現象は発生しなかった(図-11(c))。これは、第 3 章で述べたように、ケース 1 では、 R_{22} の生成に寄与するレイノルズ応力方程式の圧力歪相関項が底面から $zh \approx 0.3$ の狭い範囲でしか発生せず、高い位置で乱れの非一様性が弱まるためと考えられる。相対水深が大きくなると、この効果はさらに

弱まる。相対水深が $h/r=12.00$ のケース 4 では、OSF は水深の 67% 程度までしか到達しなかった。潤辺の粗度配置の非一様性が増したときに、大きな粗度を有する潤辺から遠い位置に向けて二次流セルが発達することは、水路の高さ方向、横断方向の違いはあるものの、富永³⁾の実験結果に対応する。また、OSF のスケールが大きくなるほど、ISF のスケールは小さくなり（ケース 1 : 0.30b, ケース 2 : 0.39b）、水面の高速流は水路中央付近に留まる。

6. 結論

本研究では、開水路粗面乱流の数値実験を行い、粗面開水路における応力と二次流の維持機構の関係、二次流のスケールに及ぼすアスペクト比と相対水深の効果を明らかにした。

- ① 粗面開水路では、時間平均流の衝突する粗度要素の前面にて圧力が増加する。レイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和 $\overrightarrow{gp_{yz}}$ は、粗度要素前面の谷部に近い断面では下向きに作用し、全体的に粗度要素間の谷部に潜り込む流れを駆動する。粗度要素前面の粗度頂部に近い断面では、上向きに働き、粗度要素を乗り越える流れを駆動する。
- ② 粗度要素前面の鉛直方向流れと OSF 及び BSF とが重なり合い、二次流は縦横断的に変化する。特に、粗度要素を乗り越える流れが発生する断面では側壁沿いの OSF や水路中央付近の BSF の上昇流が増加する。また、底面コーナーに向かう二次流は粗度要素を乗り越える流れが発生する断面で減衰し、谷部に潜り込む流れが発生する断面で増加する。
- ③ アスペクト比が大きく、相対水深が小さいほど、レイノルズ垂直応力の非一様性の強い範囲が水面に向かって広がり、OSF のスケールは大きく、ISF のスケールは小さくなる。

参考文献

- 1) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in open channels, *IAHR-monograph, CRC Press*, 1993.
- 2) 林俊一郎, 大本照憲, 本田逸郎: 直接数値シミュレーションによる開水路隅角部の三次元乱流構造の解明, *土木学会論文集 B, Vol.62, No.1*, pp.80-99, 2006.
- 3) 富永晃宏: 直線開水路流の三次元乱流構造に関する研究, *京都大学大学院学位論文*, 1988.
- 4) Ancy, C., Bigillon, F., Frey, P., Lanier, J. and Ducret, R.: Saltation motion of a bead in a rapid water stream, *Phys. Rev. E*, Vol.66, 036306, 2002.
- 5) Takakuwa, Y. and Fukuoka, S.: Three-dimensional flow structures of straight rough-bed channels with different aspect ratios, *Proc. of 10th Conf. on Fluv. Hydraul., River Flow 2020*, 2020.
- 6) Deardorff, J.W.: A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, Vol.41(2), pp.453-480, 1970.
- 7) 義江龍一郎, 野村佳祐, 堅田弘大, Jiang, G.: 都市街区内の非等温流れ場における汚染物質拡散・熱拡散に関する風洞実験と LES, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.61-66, 2012.
- 8) 河合英徳, 田村哲郎, 近藤宏二, 野津剛, ラフルバレ, 大西慶治, 坪倉誠: BCM-LES による建物周りの圧力場・流れ場解析, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.247-252, 2016.
- 9) 高鉄裕也, 福岡捷二: 浸透性固定床粗面上の乱流構造と移動粒子群による主流の構造変化, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.75, No.2, pp.I_589-I_594, 2019.
- 10) 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 禰津家久: 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法(3D MICS)の提案と適用性の検討, *土木学会論文集 B*, Vol.62, No.1, pp.100-110, 2006.
- 11) Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 12) 禰津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第 261 号, pp.67-76, 1997.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

MECHANISM FOR MAINTAINING SECONDARY FLOWS OVER ROUGHENED OPEN-CHANNELS AND EFFECTS OF ASPECT RATIO AND RELATIVE DEPTH ON SCALES OF SECONDARY FLOWS

Yuya TAKAKUWA and Shoji FUKUOKA

Numerical experiments were conducted about turbulent flows over roughened open-channels with different aspect ratios ($b/h = 0.36 \sim 1.38$) and relative depths ($h/r = 3.63 \sim 12.00$). The time-averaged flow over a bottom roughness element collides with the adjoining roughness element, and the pressure increases in front of the roughness element. It is clear that the sum of pressure and gravitational term of the Reynolds equation exerts a force toward the valley in cross-section near the valley to drive the flow sinking into the valley, and exerts upward force in cross-section near the top of roughness element to drive the flow over the roughness element. Secondary flows change longitudinally and cross-sectionally when outer secondary flow and bottom secondary flow merged with these vertical flows.