

極端に幅の狭い粗面直線水路の二次流構造に及ぼすアスペクト比と相対水深の効果

中央大学大学院 学生会員 ○高鉏 裕也
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. 序論

開水路流れにおいて、流れ構造に及ぼすアスペクト比 (b/h : b : 水路幅, h : 水深) と相対水深 (h/r : r : 底面粗度の高さ) の効果を明らかにすることは全ての水理現象に関係する重要な課題である。図-1 の模式図に示すように、矩形断面滑面直線水路では3種類の二次流セル (ISF, OSF, BSF) が発生する。OSF が水面に到達すると、水表面流速は低減され、最大主流速は水面より低い位置に現れる (velocity-dip 現象)。二次流は主流速分布を歪ませるなど、流れ構造に及ぼす影響は大きい。

本研究では、単位幅流量の等しい条件のもと水路幅 b と底面粗度 r の異なる極端に幅の狭い粗面直線水路の乱流に関する三次元数値実験 (LES) を実施し、粗面水路の底面近傍における時間平均流れの三次元構造、二次流のスケールと最大主流速の発生位置に及ぼすアスペクト比 b/h と相対水深 h/r の効果を明らかにする。

2. 数値実験手法

図-2 及び表-1 に、数値実験の概要と水理条件を示す。ケース1ではAnceyらの実験²⁾に基づき、長さ2 m、幅7 mm、勾配1/20の水路に一定流量 ($Q = 0.06$ l/s) を供給した。水路底面には直径 $2r = 8$ mm の円柱を敷き詰めた。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)。

上流端には、 $x = 0.2$ m の流速分布を毎ステップ与え、境界層が発達する距離を短くした。下流端には、1 上流側の評価点の水深を与え、下流端水深を制御した。

乱流の計測は禰津の手法³⁾に倣い、 4.0×10^{-4} s ごとに1秒間サンプリングした。なお、2秒間計測した場合と時間平

均流れの構造が変わらないことを確認している (ケース3)。解析法の詳細は文献4)を参照されたい。また、計算格子幅等は粗面水路流れを対象とした著者らの研究⁵⁾に従い設定しており、解析結果は時間平均流れに関して十分な精度を有すると考えている。

3. 結果と考察

図-3 に、粗面水路の底面近傍における時間平均流れの三次元構造を示す。円柱粗度を乗り越えた流れ (実線の矢印) は、隣接する粗度要素に衝突し、粗度要素間の谷部に潜り込む流れ (図-3 断面(I)) と上昇する流れ (図-3 断面(II)) に分離する。OSF と BSF がこれらの鉛直方向流れと重なり合うことにより、二次流は縦横断的に変化する。

図-4, 5 に、ケース3と4の主流速及び二次流の横断分

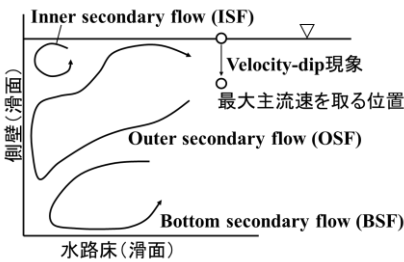


図-1 滑面水路における二次流構造 (林ら¹⁾を参考に作成)

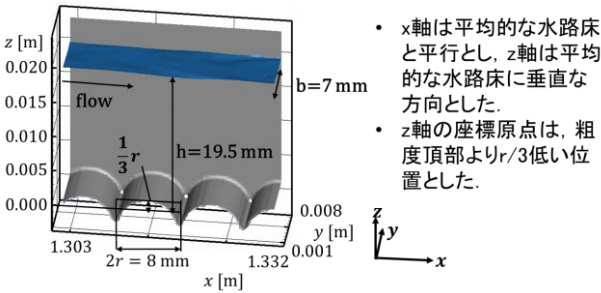


図-2 数値実験の概要 (ケース1)

表-1 水理条件

	Q	b	Q/b×10 ³	R	h	b/h	r	h/r	$\bar{u}_{max}$	U_{mean}	$U^*(R)$	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]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[m/s]	[-]		
ケース1	0.06	7	8.57	2.97	19.5	0.36	4.0	4.88	0.68	0.44	0.038	1.3E+03	2.58	0.04	0.06	×	○
ケース2	0.11	13	8.58	4.68	16.7	0.78	4.0	4.18	0.78	0.51	0.048	2.4E+03	2.40	0.07	0.09	○	○
ケース3	0.17	20	8.55	5.92	14.5	1.38	4.0	3.63	0.88	0.59	0.054	3.5E+03	2.45	0.07	0.08	○	×
ケース4	0.06	7	8.57	2.93	18.0	0.39	1.5	12.00	0.68	0.48	0.038	1.4E+03	2.81	0.03	0.04	×	○

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。

キーワード 二次流, velocity-dip 現象, アスペクト比, 相対水深, 矩形断面粗面直線水路
連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学研究開発機構福岡ユニット TEL03-3817-1615

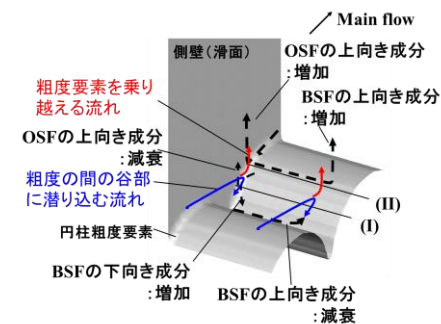


図-3 粗面水路の底面近傍の時間平均流れ三次元構造

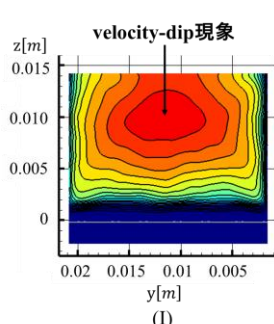


図-4(a)

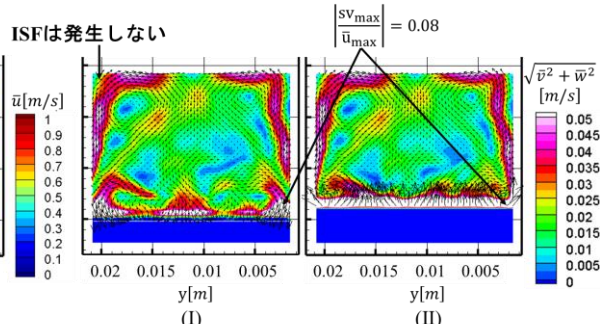


図-4 主流速(a)及び二次流速(b)の横断分布(ケース3)

布を示す。ケース3の断面(I)では、底面コーナーにてBSFの下向き成分が増加する。断面(II)では、底面近傍の上向き成分が全体的に増加する。相対水深が $h/r = 3.63$ のケース3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 0.08 とかなり大きい。相対水深が $h/r = 12.00$ のケース4では $|sv_{\max}|/\bar{u}_{\max}$ は 0.04 であり、相対水深が $h/r = 6.67 \sim 26.3$ の粗面水路実験における値 (0.03~0.04) ほどと同程度であった。

相対水深が $h/r = 3.63$ でアスペクト比 $b/h = 1.38$ のケース3では、OSFの強い上昇流が側壁沿いを水面まで進み、velocity-dip現象が発生するが、ISFは発生しない(図-4)。一方、水路幅が極端に狭い場合、図-5(c)に示すように、OSFは水面よりもかなり低い位置に形成され、OSFの弱い上昇流は側壁沿いを上昇するが水面には到達しない。このため、アスペクト比が $b/h = 0.39$ で相対水深 $h/r = 12.00$ のケース4では、最大主流速は水面に現れ、水面ではvelocity-dip現象は発生せず、ISFのみ発生する(図-5)。

二次流、特にISFの発生の有無を論ずるために解析で求めた横断方向レイノルズ方程式の各項の内、水面のコーナーで支配的な項と二次流の関係を図-6の模式図に示す。ケース3,4共に、側壁付近では横断方向流速の乱れ $\overline{v'^2}$ が減衰し、レイノルズ直応力項 $-\partial \overline{v'^2}/\partial y$ は側壁方向に作用する。これに対応するように側壁付近の水位は上昇し、圧力勾配項 $-(1/\rho)(\partial \bar{p}/\partial y)$ は水路中央方向に働く。ケース4では、レイノルズ直応力項 $-\partial \overline{v'^2}/\partial y$ が圧力勾配項 $-(1/\rho)(\partial \bar{p}/\partial y)$ と比べて若干大きく、側壁に向かう流れが発生し乱れが増加する。このため、レイノルズせん断応力 $-\overline{v'w'}$ は水面で大きくなりISFの形成に寄与する。一方、ケース3では、OSFの鉛直方向流速の変動 w' は水面で減衰し、レイノルズせん断応力項 $-\partial \overline{v'w'}/\partial z$ は水路中央方向に作用する。このため、ISFが発生しなかったと考えられる。このように、OSFが側壁沿いを水面まで進むか否かにより、水面コーナーにおけるレイノルズせん断応力項

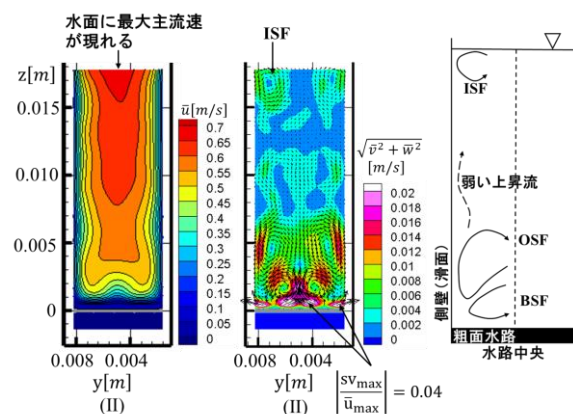


図-5 主流速(a)及び二次流速(b)の横断分布、二次流の模式図(c)(ケース4)

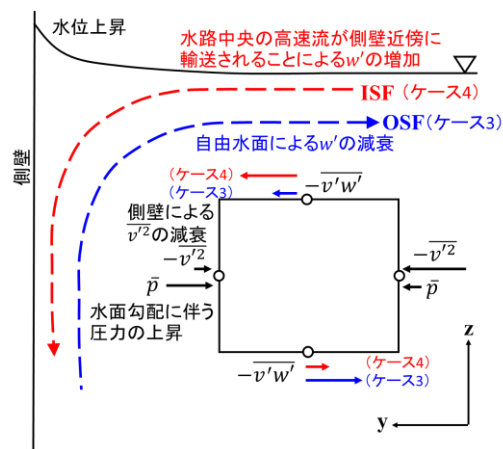


図-6 水面コーナーにおける二次流とレイノルズ垂直応力、レイノルズせん断応力及び圧力の関係

$-\partial \overline{v'w'}/\partial z$ の横断方向流速 $\bar{v}$ に及ぼす効果が変わり、ISFの発生に影響を及ぼすことが明らかになった。

今後、粗面水路における流れの瞬間構造と二次流の関係を明らかにする。

参考文献

- 1) 林ら, 土木学会論文集 B, Vol.62(1), pp.80-99, 2006.
- 2) Ancey et al., *Phys. Rev. E*, Vol.66, 036306, 2002.
- 3) 禰津, 京都大学大学院学位論文, 1977.
- 4) Fukuoka et al., *Adv. Water Resour.*, Vol.72, pp.84-96, 2014.
- 5) 高鉾, 福岡, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75(2), pp.I_589-I_594, 2019.
- 6) Tominaga and Nezu, *Proc. of 3rd Asian Congress of Fluid Mech.*, pp.608-611, 1986.