

京都大学大学院 正 員 欄津家久
京都大学大学院 学生員 中山忠暢
京都大学大学院 学生員 ○藤田正樹

1. はじめに 開水路流れでは自由水面が存在し、その近傍では乱流構造が壁面近傍のものとは大きく異なる。特に底面に粒径の大きな粗度があると、水面変動が滑面流れより大きくなるため水面近傍の乱流構造に大きな影響を与えると思われる。そこで本研究では、一様粗面上の流れ(粗度高さ $k_s=1.7\text{cm}$)を中心にレーザ流速計(LDA)による流速計測および可視化手法のPIV法を用いた瞬間構造計測により、粒径の大きな粗度が水面近傍の乱流構造に及ぼす影響を実験的に考察する。

表-1 水理条件(LDA計測,粗面流れ)

2. 実験方法および水理条件 本実験で用いた水路は長さ10m, 幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型循環式水路である。粗度要素は、直径が1.7cmのビー玉である。測定としてはLDA(レーザ流速計)を用いたものと、PIV法を用いたものが行われた。前者ではLDAにより水路側壁と底面下方から粗面開水路流れの水路中央断面の瞬間流速を計測すると同時に、超音波波高計を用いて水路上方から水面変動を測定した。表-1にLDA測定の水理条件を示す。ここに、 S :勾配, h :水深, U_m :平均主流速, U_τ :摩擦速度, Fr :フルード数, Re :レイノルズ数, k_s^+ :粗度レイノルズ数である。なお、座標原点は従来の研究結果を用いて、ビー玉の頂点からその直径の1/4だけ下方に固定した。

case	S	h (cm)	h/k_s	B/h	U_m (cm/s)	U_τ (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)	k_s^+ ($\times 10^2$)
L-FR02	1/1400	5.0	2.94	8.0	16.0	1.58	0.23	8.0	2.69
L-FR05	1/229	3.0	1.76	13.3	26.7	3.0	0.49	8.0	5.10
L-FR08	1/114	2.25	1.32	17.8	35.6	4.32	0.76	8.0	7.68
L-FR11	1/49	1.75	1.03	22.9	45.7	5.92	1.10	8.0	10.1
L-FR14	1/29	1.50	0.86	26.7	53.3	7.11	1.39	8.0	12.1
M-FR05	1/324	5.5	3.24	7.27	36.4	3.63	0.50	20.0	6.17
M-FR08	1/126	4.0	2.35	10.0	50.0	5.42	0.80	20.0	9.21
M-FR11	1/75	3.2	1.88	12.5	62.5	7.35	1.12	20.0	12.5
M-FR16	1/25	2.5	1.47	16.0	80.0	10.0	1.62	20.0	17.0
H-FR05	1/345	8.0	4.71	5.0	46.9	3.87	0.33	37.5	6.58
H-FR08	1/141	6.0	3.53	6.67	62.5	6.32	0.82	37.5	10.7
H-FR11	1/75	5.0	2.94	8.0	75.0	8.47	1.07	37.5	14.0
H-FR15	1/34	4.0	2.35	10.0	93.8	10.72	1.50	37.5	16.2
H-FR23	1/13	3.0	1.76	13.3	125.0	15.81	2.31	37.5	26.9

$k_s^+=kg_sU_\tau/\nu$; $k_s=1.70\text{ (cm)}$, $\nu=0.01\text{ (cm}^2/\text{s)}$

表-2 水理条件(PIV計測)

smooth bed									
case	S	h (cm)	h/k_s	B/h	U_m (cm/s)	U_τ (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)	k_s^+ ($\times 10^2$)
L-FR02	1/6000	5.0	8.0	16.0	0.99	0.23	8.0	8.0	2.69
M-FR06	1/1200	5.0	8.0	40.0	2.10	0.57	20.0	8.0	5.10
M-FR11	1/273	3.2	12.5	62.5	3.24	1.12	20.0	8.0	7.68
H-FR11	1/300	5.0	8.0	75.0	8.0	1.07	37.5	8.0	10.1
H-FR18	1/111	3.5	11.4	107.1	5.42	1.83	37.5	8.0	12.1
S-FR31	1/41	3.0	13.3	166.7	8.47	3.07	50.0	8.0	14.0

rough bed ($k_s=1.70\text{cm}$)									
case	S	h (cm)	h/k_s	B/h	U_m (cm/s)	U_τ (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)	k_s^+ ($\times 10^2$)
L-FR01	1/7600	8.0	4.71	5.0	10.0	1.02	0.11	8.0	1.73
L-FR02	1/1400	5.0	2.94	8.0	16.0	1.58	0.23	8.0	2.69
L-FR05	1/229	3.0	1.76	13.3	26.7	3.0	0.49	8.0	5.10
M-FR05	1/324	5.5	3.24	7.27	36.4	3.63	0.50	20.0	6.17
M-FR08	1/126	4.0	2.35	10.0	50.0	5.42	0.80	20.0	9.21
M-FR16	1/25	2.5	1.47	16.0	80.0	10.0	1.62	20.0	17.0
H-FR06	1/141	6.0	3.53	6.67	62.5	6.32	0.82	37.5	10.7
H-FR15	1/34	4.0	2.35	10.0	93.8	10.72	1.50	37.5	16.2

$k_s^+=kg_sU_\tau/\nu$, $\nu=0.01\text{ (cm}^2/\text{s)}$

次に、PIV法による滑面・粗面流れの瞬間構造計測を説明する。瞬間画像(水路中央断面 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の範囲)は、トレーサ粒子を水中に一樣に混入させ厚さ2mmのレーザライトシートを底面(または水面)に垂直にパルス的に照射し、水路側壁方向からCCDカメラで撮影した。得られた画像は1/30s間隔で記録され、コンピュータ処理された。ここでの水理条件を表-2に示す。

3. 実験結果および考察 路床が粗な場合、底面の影響が水面変動にも及ぶことが予想される。図-1は、ケースL, M, Hについて水面変動強度 h' を水深 h で無次元化した相対水面変動強度 h'/h のフルード数に対する変化特性である。レイノルズ数に関わらず一般にフルード数が大きいほど水面変動が大きくなっている。中山¹⁾による滑面流れの結果と比較すると、同一のレイノルズ数でも粗面流れの方が h'/h が大きくなっていることが確認できる。また、中山¹⁾は滑面流れでは水面変動が限界流($Fr=1.0$)付近で不安定になり h'/h が急増すると述べているが、ここではその特性は見られない。底面粗度の水面変動に対する影響力は、滑面の限界流の不安定さよりも強いと考えられる。ただし、ケースMでは他のケースとは違い、 $Fr=0.8$ 付近に明確な極大値が見られる。この原因ははっきりとはわからないが、このレイノルズ数・フルード数の条件下では底面粗度の影響力が特に強まり、水面が不安定な状態になっていると推測される。

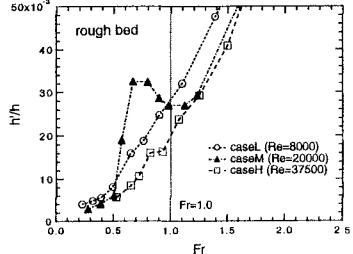


図-1 相対水面変動強度の変化特性

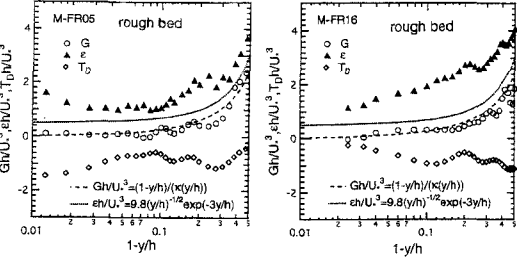


図-2 水面近傍のエネルギー収支関係

水面変動の増大は、自由水面近傍のエネルギー収支に大きな影響を及ぼすと考えられる。図-2に、ケースM-FR05,FR16について水面近傍での乱れエネルギーの逸散率 ε 、乱れの発生率 G および拡散率 T_D の関係(エネルギー収支関係)を示す。図には ε , G に関する半経験式も併示した。 G はフルード数にはほぼ無関係に普遍的特性を示しているが、 ε についてはフルード数の増加とともに増大している。この ε の特性と水面変動の関連を見るために図-3にケースL,M,Hについて、水面近傍($y/h=0.95$)の乱れエネルギーの逸散率 ε に対する相対水面変動強度 h/h の2乗の変化特性を示す。ケースMに図-2の説明でも述べたピークの影響が若干現われているが、一般に ε は $(h/h)^2$ に対してほぼ線形的に増加している。つまり、水面変動が激しいほど ε が増大し、水面近傍で失われるエネルギーが大きくなることがわかる。以上のことより、粒径の大きな粗度は、水面変動を増大させ水面でのエネルギーの損失をより大きくしているといえる。

次に、PIV法で得られた瞬間構造について滑面・粗面流れを比較する。図-4は、滑面流れのケースL-FR02の瞬間流速ベクトルを0.2秒間隔に平均主流速を差し引いて示したものである。流れの向きは左から右である。同図のA,Bの動きから、水深の約2倍のスケールの周期的な組織構造が認められる。また、A,Bには上昇流体が見られる。Aでは水面近傍にまで上昇しているが、水面に近付くとともに勢力は弱まっている。これは、水面が穏やかなために弱い壁として働き、鉛直方向の乱れを低減させるためといえる。

一方、図-5は粗面流れのケースL-FR02について図-4と同様に示したものである。図中のA,B,Cより組織構造が確認できるが、滑面流れとは違い、壁面近傍の組織構造の発生は周期性が崩れて不規則になっている。また、水面に向かう上昇流体は見られず、組織構造は $y/h=0.2\sim0.7$ の位置を保って移動している。これはRaupach²⁾が示したように粗度近傍でsweepが強くなっているためと推定される。

4. おわりに 本研究では、粒径の大きな粗度が乱流構造に及ぼす影響を主に水面変動に着目して考察した。滑面流れとの相違は水面変動特性だけでなく組織構造の特性にも見られた。特に上昇流体の勢力が粗度によって弱められていた。

参考文献

- 1) 中山忠暢: "自由水面近傍の乱流構造と組織渦の水理特性に関する研究", 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻修士論文, (1997).
- 2) Raupach, M. R.: "Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers", *J. Fluid Mech.*, vol.108, pp.363-382, (1981).

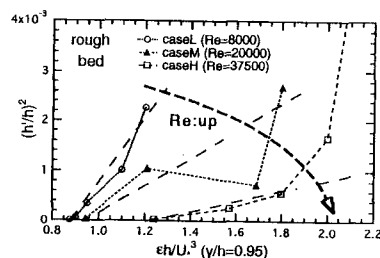


図-3 ε と $(h/h)^2$ の関係

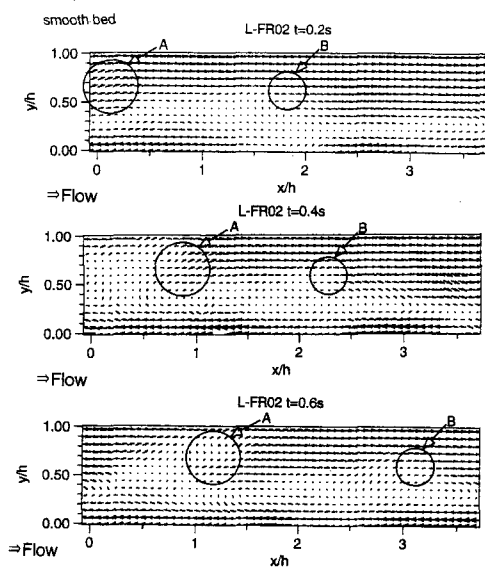


図-4 瞬間流速ベクトル(滑面流れのL-FR02)

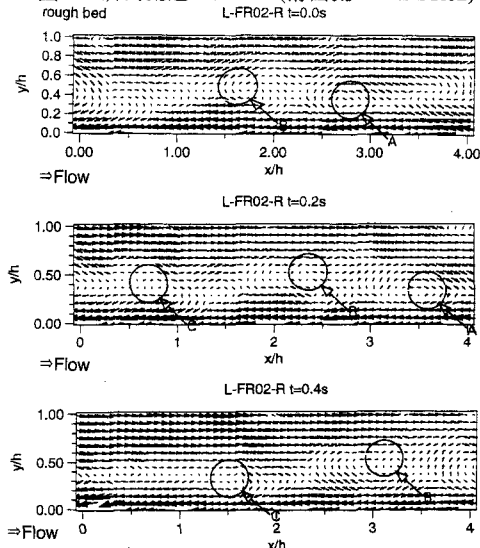


図-5 瞬間流速ベクトル(粗面流れのL-FR02)