

II-282

相対水深の小さな開水路流の水面近傍における乱流構造

京都大学大学院 学生員 ○藤田正樹

京都大学大学院 正 員 榎津家久

京都大学大学院 学生員 中山忠暢

1. はじめに 自由水面は開水路流れに特有なものであり、その近傍の乱流構造は壁面近傍のものとは著しく異なる。特に粒径の大きな粗度が底面にあると、水面変動が滑面流れより大きくなり、水面近傍の乱流構造は大きな影響を受けるとされる。そこで本研究では、主に一樣粗面(粗度高さ $k_s=1.7\text{cm}$)上の流れに対してレーザ流速計(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を行い、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。

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、 $Fr=U_m/\sqrt{gh}$:フルード数、 $Re=U_m h/\nu$:レイノルズ数、 $k_s^*=U_\tau h/\nu$: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。

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。

表-1 水理条件(LDA計測,粗面流れ)

case	S	h (cm)	h/k _s	B/h	U _m (cm/s)	U _τ (cm/s)	Fr	Re (x10 ³)	k _s ⁺ (x10 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	4.52	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-FR15	1/29	1.50	0.88	26.7	53.3	7.11	1.39	8.0	12.1
M-FR05	1/229	5.5	3.24	7.27	36.4	3.63	0.50	20.0	6.17
M-FR08	1/128	4.0	2.35	10.0	50.0	5.42	0.80	20.0	9.21
M-FR11	1/67	3.2	1.88	12.5	62.5	7.35	1.12	20.0	12.5
M-FR15	1/25	2.5	1.47	16.0	80.0	10.0	1.62	20.0	17.0
H-FR05	1/245	8.0	4.71	5.0	46.9	3.97	0.53	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	8.25	1.07	37.5	14.0
H-FR15	1/34	4.0	2.35	10.0	93.8	10.72	1.50	37.5	18.2
S-FR23	1/13	3.0	1.76	13.3	125.0	15.81	2.31	37.5	26.9

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

表-2 水理条件(PIV計測)

case	S	h (cm)	h/k _s	B/h	U _m (cm/s)	U _τ (cm/s)	Fr	Re (x10 ³)	k _s ⁺ (x10 ²)
L-FR02	1/6000	5.0	8.0	16.0	0.99	0.23	0.23	8.0	2.69
M-FR05	1/1200	5.0	8.0	40.0	2.10	0.57	0.57	20.0	6.17
M-FR11	1/273	3.2	12.5	62.5	3.24	1.12	1.12	20.0	12.5
H-FR11	1/300	5.0	8.0	75.0	3.80	1.07	1.07	37.5	14.0
H-FR15	1/111	3.5	11.4	107.1	5.42	1.83	1.83	37.5	18.2
S-FR31	1/41	3.0	13.3	166.7	8.47	3.07	3.07	50.0	26.9

case	S	h (cm)	h/k _s	B/h	U _m (cm/s)	U _τ (cm/s)	Fr	Re (x10 ³)	k _s ⁺ (x10 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	1/229	5.5	3.24	7.27	36.4	3.63	0.50	20.0	6.17
M-FR08	1/128	4.0	2.35	10.0	50.0	5.42	0.80	20.0	9.21
M-FR15	1/25	2.5	1.47	16.0	80.0	10.0	1.62	20.0	17.0
H-FR08	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	18.2

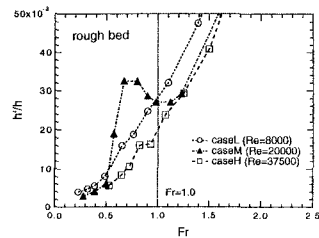
 $k_s^*=k_s U_\tau/\nu$, $\nu=0.01\text{ (cm}^2/\text{s)}$ 

図-1 相対水面変動強度の変化特性

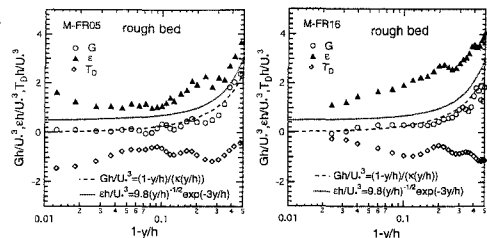


図-2 水面近傍のエネルギー収支関係

キーワード (自由水面, 水面変動, 乱流構造, 粗面, 滑面)

連絡先 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5081 FAX: 075-753-5066)

水面変動が増大すると、水面近傍のエネルギー収支に大きく影響を及ぼすと思われる。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を滑面・粗面流れについてそれぞれ1ケースずつ見ていく。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させるためといえる。

一方、図-5は粗面流れで水面変動の激しいケースH-FR15について図-4と同様に示したものである。図中のA,B,C,Dの部分には組織渦が顕著に見られ、底面粗度による渦の発生が活発化していると考えられる。特にA,Bの部分における渦は、移流される過程で水面近傍にまで上昇している。Jackson²⁾が指摘したように、ここで見られるような渦が実河川において水面に沸きだすように観察されるというボイル運動の要因になっていると推測される。

4. おわりに 今研究では、水面近傍の乱流構造が粒径の大きな粗度から受ける影響について主に水面変動との関連性に着目して考察した。水面変動特性において滑面流れとの明確な相違が見られた。また、組織渦の移流される様子が確認されただけでなく、粗面流れで水面変動が激しいときには渦が底面から活発に発生していることがわかった。

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) Jackson, R. G.: "Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows", *J. Fluid Mech.*, Vol.77, pp.531-560, 1976.

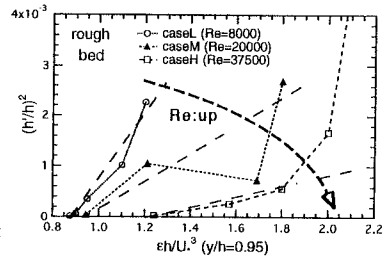


図-3 ε と $(h/h)^2$ の関係

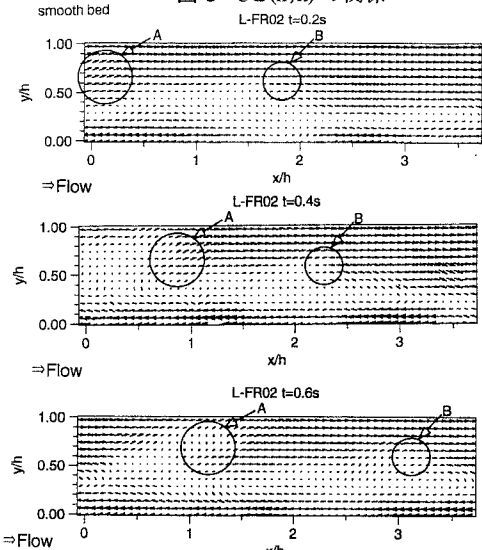


図-4 瞬間流速ベクトル(滑面流れのL-FR02)

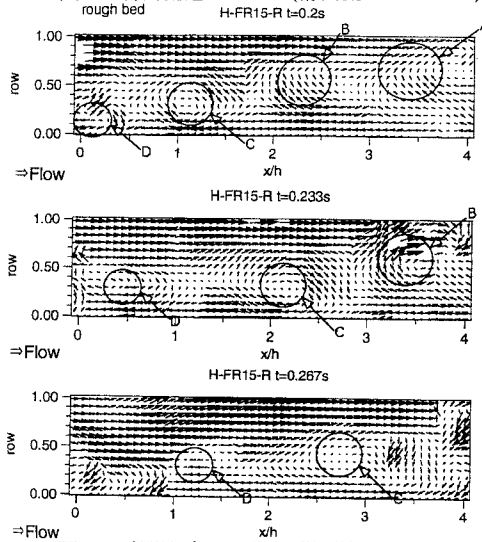


図-5 瞬間流速ベクトル(粗面流れのH-FR15)