

相対粗度の大きい開水路流れの抵抗特性と流動機構

熊本大学大学院 学生会員 栗嶋優希 熊本大学大学院 学生会員 安田信洋
 熊本大学大学院 正会員 大本照憲 熊本大学工学部 学生会員 松尾隆太郎

1. はじめに

礫床河川に見られる瀬は淡水魚や底生生物に良好な生活の場を提供することが知られている。瀬の生物環境においては、河床礫に付着する藻類は一次生産物として魚類や昆虫類の餌となることによって食物連鎖を支えている。それ故、付着藻類の一次生産活動や現存量の特性を明らかにすることは河川の生態系をその根底から解明していくための重要な課題となっている。瀬を形成する巨礫河床では、枯死状態の付着藻類や微細土砂の堆積がよく観察されるが、その原因の解明に至る流れ場の詳細は、十分に検討されていない。礫近傍の流れは付着藻類を含めた底生生物の生息・生育環境にとって極めて重要な場となる。しかし、既往の研究では熱線流速計やレーザー Doppler 流速計等を用いた実験的研究事例が多く、流れの空間変動特性については十分に検討されていない。そこで球状粗度および円柱粗度上の流れを面計測が可能な粒子画像流速測定法(PIV)を用いて測定した。水深に対して相対的に大きな粗度上の流れにおいては、粗度近傍に安定した規則性の高い上昇流及び下降流を見出している。その結果、Raupach等¹⁾によって定義された粗度の影響が強い Roughnes sublayer内の流れにおいては、平均流および乱れの水平面内の一様性が大きく崩れ、粗度要素の影響が極めて強いことが明らかにされた。

本研究では、球状粗度および円柱粗度における粗面乱流の抵抗則について考察すると共に、平均流および乱れ特性に与える相対粗度の影響を詳細に検討した。

2. 実験装置及び実験方法

実験に使用した水路は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 20cm

の可変勾配型の循環式直線水路である。抵抗係数の実験条件は表 - 1、流れ構造の実験条件を表 - 2 に示す。計測対象領域の座標系および計測システムは図 - 1 に示す。右手座標系を用い、流下方向を x 軸、水路横断方向を y 軸、鉛直上向きを z 軸とし、それぞれに対応した平均流速成分を U, V, W 、変動成分を u', v', w' とする。水路床は、直径 15mm、及び直径 30mm の 2 種類の球および円柱棒を水路上流端より 2m の位置から流下方向に長さ 6m に亘り敷き詰めた。表 - 1 から明らかな様に、何れのケースも粗度レイノルズ数は 70 を超え、完全粗面であることが分かる。水深の計測には、ポイントゲージを用い、流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法である PIV 法を用いた。光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザー(出力 15mJ)を用い、シート光の厚さを 1mm、パルス間隔を 500 μ s に設定し、水路上方から底面に垂直下向きに照射した。レーザー光と CCD カメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、15fps(frame per second)、960 \times 1018(pixel)のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV 法によって処理された。レンズには焦点距離が 50mm のものを用いた。ここに 1pixel の最小サイズは 0.06mm である。流速のサンプリング周波数は 15Hz、1 計測面での画像データは 1000 枚、計測時間は 66.7sec であった。なおトレーサーとして粒径 5 μ m、比重 1.02 のナイロン粒子をアルコール液で十分に攪拌して水中に一様に混入した。

3. 粗面乱流の抵抗特性

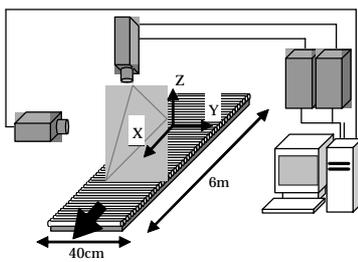
図 - 2 は抵抗係数 f とレイノルズ数との関係を示したものである。滑面開水路乱流において適合性の高い Blasius の式と比較するとレイノルズ数が 10000 あたりまでは減少傾向が大きいとその値を超えたあたりからはほぼ同様の減少傾向を示している。このことからレイノルズ数が大きな領域で抵抗係数はレイノルズ数に

表 - 1 実験条件(抵抗則)

ケース	粗度径	勾配 (I_0)	流量 (l/s)
球状粗度	A-1	15	1/500
	A-2		1/300
	B-1	30	1/500
	B-2		1/300
円柱粗度	C-1	15	1/500
	C-2		1/300
	D-1	30	1/500
	D-2		1/300

表 - 2 実験条件(流れ場)

	Case1	Case2	Case3	Case4
平均流速 U_m (cm/s)	21.4	25.9	22.0	20.4
水深 H (cm)	1.90	2.90	1.86	3.68
水路勾配 I_0	1/300	1/300	1/300	1/300
75 \times 外比 B/H	21.0	13.8	21.5	10.9
フルド数 $U_m/(gH)^{1/2}$	0.49	0.48	0.50	0.34
レイノルズ数 $U_m H/\nu$	4066	7499	4092	7500
粗度レイノルズ数 $u_* D/\nu$	282	983	360	1040
相対粗度 D/H	0.79	1.03	0.80	0.82
粗度径 D (mm)	15	30	15	30
摩擦速度 u_* (cm/s)	1.88	3.39	2.46	3.46
流量 Q (l/s)	1.63	3.00	1.63	3.00



Double - pulsed LASER Illumination
 Laser sheet
 CCD - Camera Kodak Mega plus ES1 . 0
 YAG - Laser Main unit
 P . C . with Visiflow - software(Timing control & Analyze)

図 - 1 流れの計測システム

依存しないことがわかる。また，球状粗度と円柱粗度について比較すると，ほぼ同様の減少傾向を示しており，いずれのケースにおいても球状粗度の方が抵抗係数 f が大きくなっている。

4. 平均流特性

PIV 法により得られた鉛直方向流速成分 W の空間分布特性を図 - 3，主流速 U の流下方向変化を図 - 4 に示す。

図 - 3 より何れの場合も，極めて規則的に粗度頂部の若干上流側において上昇流，若干下流側で下降流が生じ，流下方向の分布系は鉛直方向に相似形を保っていることが認められる。上昇流は狭い領域で強い流れであるのに対して，下降流は相対的に広い領域で弱い流れである。また，球状粗度のほうがより強い上昇流，下降流を形成している。

主流速 U は，鉛直方向流速成分 W と同様に流下方向に極めて規則的な変動を示し，粗度頂部の近傍で極大値を示していることがわかる。

5. 乱流特性

図 - 5 は，球状粗度及び円柱粗度の各粗度径におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ の鉛直方向変化を示す。レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ は，粗度径において比較すると，球状粗度，円柱粗度ともにその欠損量は粗度径 15mm よりも 30mm において大きく現れることがわかる。これは流線の曲がりに伴う遠心力効果が原因と推測される。また，粗度形状による比較をすると，直線分布からの欠損量は円柱粗度のほうがより大きくあらわれていることが分かる。従来指摘された粗度近傍におけるレイノルズ応力の直線分布からの欠損量は，粗度付近において特に大きく現れ，上層では小さくなっている。

6. おわりに

本研究では，相対粗度が大きい粗度上の流れを，面計測が可能なPIV法を用いて測定した。Raupach等¹⁾によって定義された粗度の影響が強いRoughnes sublayer内の流れにおいては，平均流および乱れの一様性が大きく崩れ，粗度要素の影響が強いことが明らかにされた。

参考文献

1) Raupach, M.R.: Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers, J. Fluid Mech, Vol.450, pp317-341, 1981.

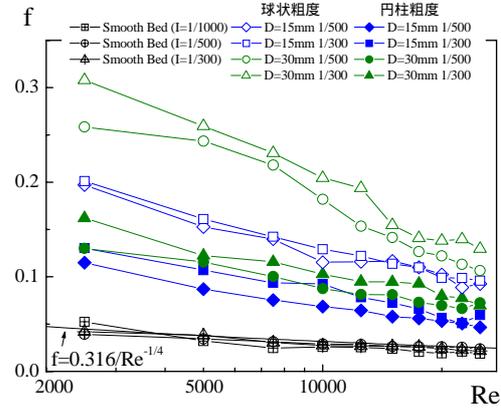


図 - 2 円柱粗度の抵抗係数 f と Re 数の関係

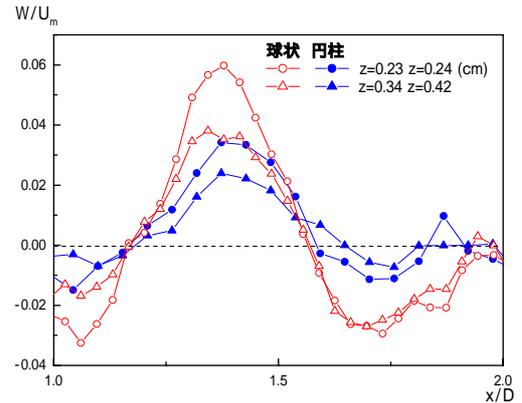


図 - 3 鉛直方向流速成分 W の流下方向変化 ($D=30\text{mm}$)

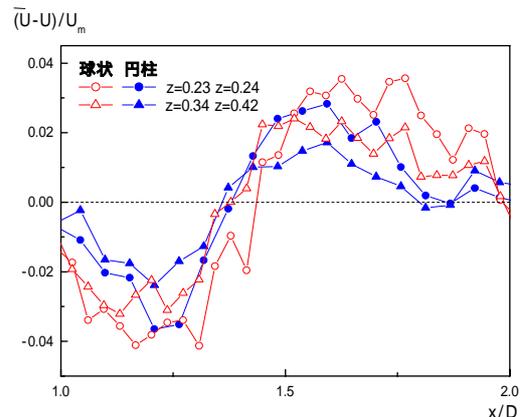


図 - 4 主流速の変動の流下方向変化 ($D=30\text{mm}$)

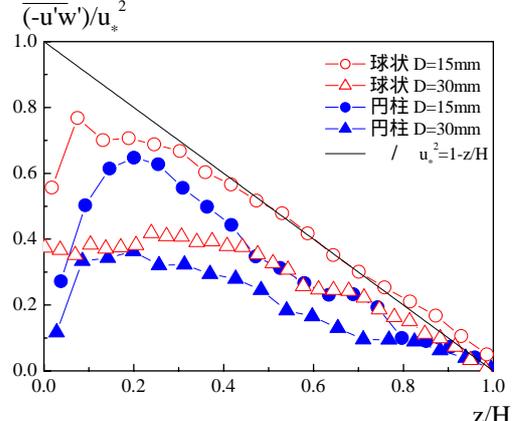


図 - 5 1 粒径間のレイノルズ応力の鉛直方向変化