球状粗度に伴う開水路流れの抵抗特性と乱流構造

1.はじめに

確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 して魚類や昆虫の餌となることによって食物連鎖を見 して無類や 能出の 開となることによって 良物 連 銀を 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 土砂の堆積が良く観察されるが,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 の流れば付着藻類を含めた底生生物の生息・生育の現容 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ドップラー流速計等の点計 測を基にし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把握されていない.そこで、礫 床流れを考える上の基本ともいえる球状粗度上の流れ 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 および下降流の存在することを見出している.その結 果,Raupach 等によって定義された粗度の影響が強い Roughness ublayer 内の流れにおいては,平均流および乱 れの水平面内における一様性が大きく崩れ,粗度要素 れの水平面内における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.実験装置及び方法 実験に使用した水路は、長さ10m 幅 40cm 高さ20cm 実験に使用した水路は、長さ10m 幅40cm、高さ20cm のアクリル樹脂性からなる可変勾配型の循環式直線水 路である.実験条件を表・1に示す.計測対象領域の座 標系および本実験の計測システムは図・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種類のガラス球を 水路上流端より2mの位置から流下方向に長さ4mに亘 り最充填密度で敷き詰めた.表・1からも明らかな様に 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.



熊本大学	学生会員	馬場太郎
熊本大学	学生会員	安田信洋
熊本大学	正会員	大本照憲

光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザー(出力 25mJ) を用い,シート光の厚さを 1mm,パルス間隔を 500µs 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の 視化画像は,15fps(frame per second),960×1018(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ー のハードディスクに記録され,PIV法によって処理され のハートティスクに記録され、PIV 法にようて処理され た.レンズは焦点距離が 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 5µm,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.流速 を計測した実験条件を表-2に示す.

3.粗面乱流の抵抗特性

図-2 は,抵抗係数と相対粗度との関係を示す.抵抗 係数は,相対粗度の増加に伴って増加する傾向のある ことが分かる.また,相対粗度0.6を境として同じ相対 粗度では,直径 D=30mm が D=15mm に較べて抵抗係数 が大きくなる傾向が見られる.完全粗面における流速 分布に対数則を適用すれば,抵抗則は次式の様に表さ れる.

$$\sqrt{8/f} = \frac{U}{u_*} = \frac{2.3}{\kappa} \log(h/k_s) + B_r$$
(2)

ここに, k_sおよび B_rは砂粒相当粗度および完全粗面 の積分定数であり, 粗度の形状, 配列, および大きさ によって異なる定数である 図中の実線では k_s=D とし, B_r = 6.0 とした.この他に, べき乗則として以下の Manning-Strickler の経験式,

$$\sqrt{8/f} = 7.6 (h/d_{50})^{1/6}$$
(3)

および粗度の大きな礫床河川において見出された Kellerhalls による経験式がある.

$$\sqrt{8/f} = 6.5 (h/d_{50})^{1/4}$$
(4)

表-1 実験条件(流れ構造)

		Case1	Case2
平均流速	U _m (cm/s)	22.0	20.4
水深	H(cm)	1.86	3.68
勾 配	I_0	1/300	1/300
ፖ スペクト比	B/H	21.5	10.9
フルード数	$U_{m}/(gH)^{1/2}$	0.5	0.34
レイノルス・数	$U_m H/\nu$	4092	7500
粗度レイノルズ数	u∗D/ν	360	1040
相対粗度	D/H	0.80	0.82
粗度長さ	D(mm)	15	30

表-2 実験条件(抵抗則)

ケース	粗度径(mm)	勾配(I ₀)	流量 (1/s)	
A-1	30	1/500		
A-2	50	1/300		
B-1		1/1000	1~10	
B-2	15	1/500		
B-3		1/300		





4.平均流特性 PIV より得られた鉛直面内の鉛直方向流速成分 W の 空間分布特性を図 - 3,図 - 4 に示す.なお,鉛直座標系 z の原点は中川等と同様にガラス球の頂部に設定した. - 1 に示す通り、粗度は 15mm および 30mm で異なる

が,相対粗度はほぼ0.8となっている. 図-3および4は,各々,粗度径15mm(相対粗度0.8) および粗度径30mm(相対粗度0.82)における鉛直方向流 速成分 W の流下方向変化を示す.何れの場合も,極め 医成为 W の加下方向复代を示す、何れの場合も,極め て規則的にガラス球頂部の若干上流側において上昇流 ガラス球頂部の下流側で下降流が生じ,流下方向の分 布形は鉛直方向に相似形を保っていることが認められ る.また,上昇流および下降流の極大値は,粗度径15mm では断面平均流速の 5%および 3%であるのに対して 粗度径 30mm では,6%および 5%であり,縦筋河床上 の流れ¹⁴⁾と同程度である.また,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.

<u>5.乱流特性</u> 相度径 15mm および相度径 30mm における鉛直面内の 主流速変動 u'および鉛直流速変動 w'の強さを図 - 5 および 6 に示す.図中の実線および破線は,禰津等によって提案された乱れの強度式¹⁾を示す.

って提案された乱れの強度式¹⁾を示す. 全般的に乱れの強さ ums/u*, wms/u*は流下方向には粗度 頂部近傍で極小値, 粗度接触部で極大値を取る傾向を もつことが分かる.鉛直方向には,粗度頂部および 粗 度接触部の上層で大きく異なり,粗度径 15mmの粗度 接触部では,禰津等の提唱する乱れ強度式によって良 好に再現されているのに対して,粗度径 30mmでは, 粗度効果が明瞭に現れ,ums/u*に着目すれば相対水深 z/H<0.4の領域では乱れの強さは鉛直上方に向かって指 数関数的減少を示してはおらず,一様化していること が認められる.図-7および8は,各々,粗度径15mm および粗度径 30mmにおけるレイノルズ応力-u`w`/u*² の鉛直分布を示す.レイノルズ応力-u`w'/u*² の鉛直分布を示す.レイノルズ応力-u`w'/u*² れによる運動量輸送は小さいことが分かる.粗度径 れによる運動量輸送は小さいことが分かる. 粗度径 15mm では,相対水深力-uw⁷u²の直線分布からの欠損 量は、粗度頂部において大きく現れ、粗度頂部では

小さい.一方 ,粗度径 30mm におけるレイ ルズ応力-u'w'/u* は z/H=0.4 より上層 ではせん断力 τ の直 線分布に従っている が その下層では粗 度径 15mm の場合に 較べてより鮮明に欠 損量の空間的変化が 現れている.主流速

-O- z=0.11

- x/D=1.12

- x/D=1.38 - x/D=1.53 - x/D=1.65 -▼- x/D=1.65 -□- x/D=1.85

z/H



の空間分布が対数分布則からずれる高さをRoughness Sublayer の厚さ δ_R と定義すれば,その大きさは δ_R =D/3 であり,乱れ特性量はこの上層では既往の完全粗面乱 流とほぼ一致しているが,下層では粗度からの剥離渦, 流線の曲がりに伴う遠心力効果および加速・減速効果 を受けて非一様性の強い乱れ構造を示す.

<u>6.おわりに</u>

本研究では,相対粗度が大きい球状粗度上の流れを 面計測が可能な PIV 法を用いて測定した.Raupach 等²⁾ によって定義された粗度の影響が強い Roughness 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

- Iehisa Nezu,Hiroji Nakagawa:Turbulence in open-channel flows,IAHR. Balkema, pp.57-58, 1993. 1) in
- Raupach, M.R.: Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers, J.Fluid Mech., Vol. 450, pp. 317-341, 1981.
- 大本照憲,柿原ゆり,崔志英:相対粗度の大きい開水路 流れの乱流特性について,水工学論文集,第 49 巻, pp.511-516,2005