

開水路乱流に与える球状粗度の影響について

EFFECTS OF REGULARLY ARRAYED SPHERE ROUGHNESS ON SHALLOW TURBULENT FLOW IN AN OPEN CHANNEL

大本 照憲¹・馬場 太郎²・崔 志英³
Terunori OHMOTO, Taro BABA and Zhiying CUI

¹正会員 工博 熊本大学大学院教授 大学院自然科学研究科 (〒860 熊本県熊本市黒髪2-39-1)

²学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (同上)

³学生会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科 (同上)

Effects of regularly arrayed sphere roughness on flow resistance and turbulent characteristics in an open channel have been investigated over a completely rough - bed with uniform glass beads, where the sphere diameter were 15mm and 30mm. Detailed spatial measurements of streamwise and vertical velocity fluctuations were conducted using Particle Image Velocimetry (PIV) in a vertical plane along the completely rough bed surface. Experimental results indicated significant degrees of spatially regular variation in the time - averaged velocities, where the upflow velocity was much stronger than the downflow one and inhomogeneous turbulent characteristics were generated along the rough bed in case of the large ratio of the sphere diameter to flow depth. In addition, Reynolds shear stress and turbulent intensity showed minimum values at the ridge of roughness elements and maximum ones at the trough. These organized flow structure were caused by the vortex shedding generated by the roughness elements.

Key Words : open-channel shallow flow, relatively large roughness, turbulent characteristics, PIV

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。

礫に較べて相対的に水深が小さい流れは、山地部の砂礫河川、地表や路面上の薄層流れ、急勾配水路流れおよび護岸上の流れ等においても観察される。

粗度スケールが水深と同レベルの境界における流れの抵抗特性については、不明な点が多い。レイノルズ数が十分に大きな完全粗面乱流の抵抗係数は、Prandtl-von Karmanの対数則形式やManningの粗度係数の大きい場合には統一的に表現できないことが指摘されている¹⁻⁴⁾。

本研究が対象とする相対水深の小さな流れ構造につい

ては中川等^{5),6)}によって検討されており、球状粗度の河床近傍において平均流速分布や乱れ強度の一様化、Reynolds応力の欠損が観測され、その特性は粗度要素からの剥離放出渦に依存することが指摘されている。

禰津等⁷⁾はレーザー流速計による計測結果から、粒径の大きな球状粗度が水面変動や水面近傍の乱流構造に及ぼす影響について検討し、粗面流れの水面変動特性、乱流構造および乱れエネルギーの収支関係を検討している。

Nikora等⁸⁾は、超音波流速計を用いて流れの計測を行い、球状粗度上に付着藻類が発生した開水路流れにおいて生物膜と粗度近傍の流れの相互作用について検討し、生物膜は粗度高さを16-21%増大させ、粗度近傍における平均流速、Reynolds応力、乱れの強さおよび乱れエネルギーの鉛直乱流フラックスが減少することを明らかにしている。また、生物膜は粗度上における速度変動のスペクトルエネルギーを減少させ、さらに組織的渦構造におけるSweep事象が付着藻類への栄養塩の供給に重要であることを示した。

Cooper等⁹⁾は均質な礫床上の流れにおける礫近傍において水平面内の時間平均流速の空間変動が、同一平面における空間平均流速の21%に達し、その変動は水深の増大に伴って大きくなることを指摘している。

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
水路勾配 I_0	1/300	1/300
アスペクト比 B/H	21.5	10.9
フルード数 $U_m/(gH)^{1/2}$	0.5	0.34
レイルス数 $U_m H/\nu$	4092	7500
粗度レイルス数 $u_* D/\nu$	360	1040
相対粗度 D/H	0.80	0.82
粗度径 D (mm)	15	30
摩擦速度 u_*	2.46	3.46

近年では、流れの可視化や点計測によって見出された球状粗度上における乱流の組織的構造の存在¹⁰⁾がDNS¹¹⁾(Direct Numerical Simulation)やLES¹²⁾(Large Eddy Simulation)によって指摘されているが、粗度近傍の流れについては不明な点が残されている。

上記の様に、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。

著者等¹³⁾は、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 Sublayer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の可変勾配型の循環式直線水路である。水路床および側壁はアクリル樹脂製となっており、側壁からのカメラ撮影が可能となっている。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。粗度の配列を、図-2に示

表 - 2 実験条件(抵抗則)

ケース	粗度径(mm)	勾配(I_0)	流量 (l/s)
A-1	30	1/500	1~10
A-2		1/300	
B-1	15	1/1000	
B-2		1/500	
B-3		1/300	

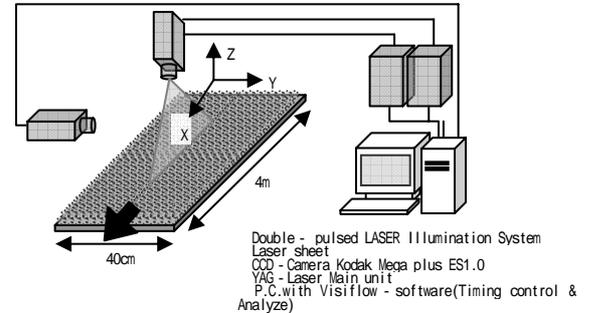


図 - 1 流れの計測システム

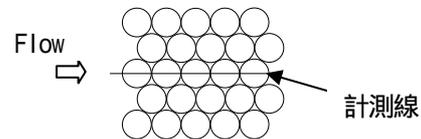


図 - 2 粗度の表層配列

す。表-1からも明らかな様に、何れのケースも粗度レイルス数は70を超え、完全粗面であることが分かる。

測定位置は、ガラス球の粗面先端より2.5m下流位置で行った。流れは、所定の流量を通水し下流端の堰を調整することによって等流とした。なお、摩擦速度は $u_* = \sqrt{gHI_0}$ より算定した。

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25mJ)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30 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樣に混入した。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

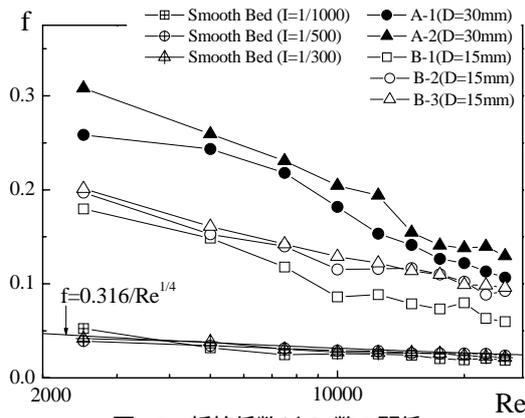


図 - 3 抵抗係数fとRe数の関係

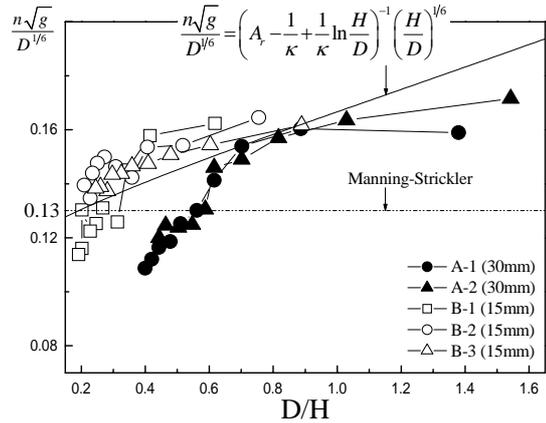


図 - 5 Manningの粗度係数と相対粗度の関係

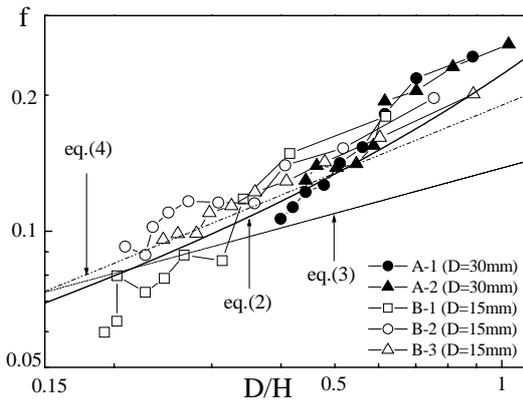


図 - 4 抵抗係数fと相対粗度の関係

$$f = \frac{\tau_0}{1/8 \rho U_m^2} = \frac{8ghI_0}{U_m^2} \quad \dots\dots(1)$$

開水路流れの抵抗係数fは、Darcy-Weisbachの式を用い
れば、以下ようになる。

ここに、 τ_0 は底面せん断力、 ρ は水の密度、Uは断面
平均流速、 I_0 は水路勾配、hは水深、gは重力加速度であ
る。本研究では、相対粗度の大きな球状粗度における抵
抗特性を検討対象としている。

図 - 3は抵抗係数とレイノルズ数との関係を示す。図
より相対粗度の大きい流れの抵抗係数はレイノルズ数が
 10^4 までは急激な減少傾向を示すが、この値を超えた辺
りからレイノルズ数の増加に対して滑面開水路乱流にお
いて適合性の高いBlasiusの式で求められた曲線とほぼ
平行に近い減少傾向を示すことが認められ、レイノルズ
数の大きな領域ではその影響が弱まることが分かる。た
だし、開水路流れの抵抗特性の算定においては、円管路
とは異なりレイノルズ数の影響を全く無視することはで
きないことが示唆される。また、ガラス球の直径D=15mm
と30mmとの比較では、D=30mmのケースで大きく、相対粗
度の影響が現れている。図 - 4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

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

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。

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、

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

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。

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

図よりManning-StricklerおよびKellerhallsの経験式
は、適合性が低く、両者の比較ではKellerhallsの経験
式が優れていることがわかる。対数則は、上記のべき乗
則に較べて適合性が高い。しかし、相対粗度の大きい領
域で適合性が低くなることが認められる。この点につ
いては、次節で議論されるが、特に相対粗度の大きい領
域では剥離渦や粗度近傍の流線の曲がりに伴う遠心力が大
きく影響することが示唆される。

図 - 5は、無次元化されたManningの粗度係数と相対粗
度との関係を示す。図より無次元化されたManningの粗
度係数は、相対粗度の増大と共に増大する傾向のある
ことが認められる。Manning-Stricklerの経験式では、無
次元化されたManningの粗度係数は、相対粗度に大きく
依存しないのとして仮定しているが、本実験が対象と
した相対粗度の範囲ではこの仮定は成り立たないことが
分かる。次節以降では、図 - 4において実測値に対して
従来の抵抗係数が過小評価された相対粗度の比較的大
きい領域で、粗度の流れ構造への影響について検討する。

4. 平均流特性

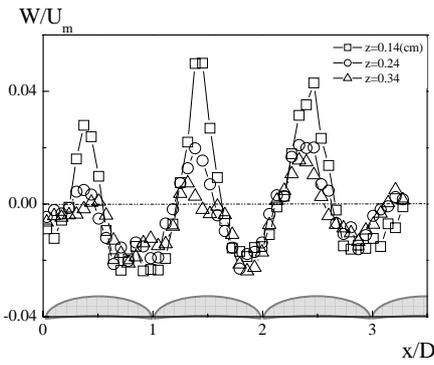


図 - 6 鉛直方向流速成分Wの
流下方向変化 (Case1)

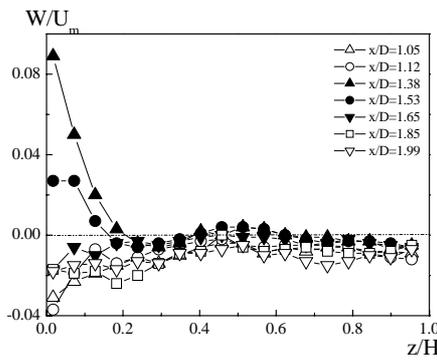


図 - 8 鉛直方向流速成分Wの
鉛直方向変化 (Case1)

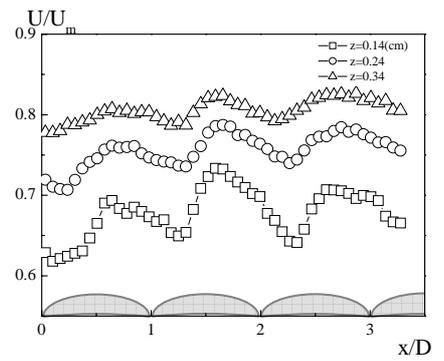


図 - 10 主流速Uの流下方向変化
(Case1)

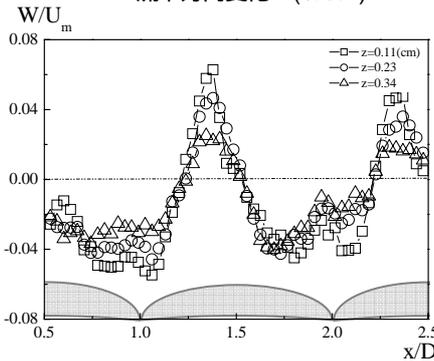


図 - 7 鉛直方向流速成分Wの
流下方向変化 (Case2)

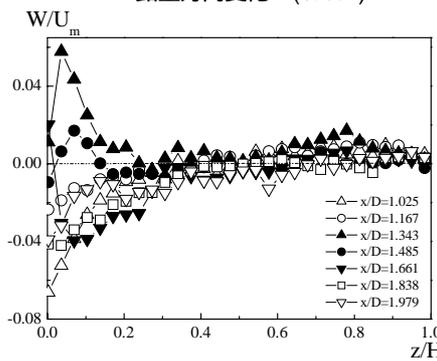


図 - 9 鉛直方向流速成分Wの
鉛直方向変化 (Case2)

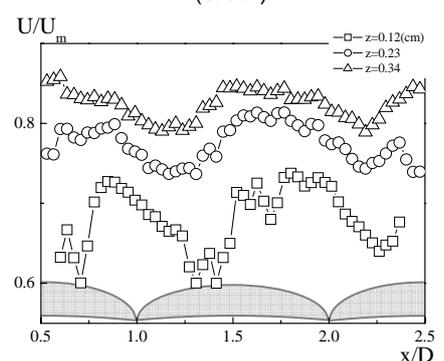


図 - 11 主流速Uの流下方向変化
(Case2)

PIVより得られた鉛直面内の主流速Uおよび鉛直方向流速成分Wの空間分布特性を図 - 6 ~ 図 - 13に示す。なお、鉛直座標zの原点は中川等と同様にガラス球の頂部に設定した。表 - 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 - 6および7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、縦筋河床の上流れ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。

図 - 8および9は、各々、粗度径15mmおよび粗度径30mmにおける鉛直方向成分Wの鉛直方向変化を示す。上昇流および下降流の何れも路床近傍の $z/H < 0.3$, $z/D < 1/3$ の領域で大きな値を示し、上方に減少傾向を示すことが認められる。

図 - 10および11は、各々、粗度径15mmおよび粗度径30mmにおける主流速Uの流下方向変化を示す。主流速は、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す。その位置が上昇流の発生位置に近い。一方、路床近傍における主

流速の極小値は上昇流の発生位置と近い所で現れ、主流速と二次流の鉛直成分との関係が縦筋河床の上流れ¹⁵⁾に近い関係であることが分かる。

図 - 12および13は、各々、粗度径15mmおよび粗度径30mmにおけるRidge Line上の主流速Uの鉛直方向変化を示す。図中の実線は、下記による完全粗面の対数分布則を示す。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z + \Delta z}{k_s} \right) + 8.5 \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度, $\kappa = 0.41$: カルマン定数, z は粗度頂部からの原点補正量, k_s は粗度長である。 k_s および Δz は対数則との適合性から選定した。Case1については $z/D = 0.15$, $z/k_s = 0.27$ となり、Case2では $z/D = 0.36$, $z/k_s = 0.17$ となった。これらは従来¹⁶⁾の $z/k_s = 0.15 \sim 0.30$ に近い値を示している。

主流速は、粗度頂部からの無次元高さ $z_r = u_* z / \nu = 30 \sim 40$ より下層までは全般的に対数則分布に較べて相対的に小さく、その差は特に粗度頂部近傍において大きいことが分かる。粗度頂部近傍においては、その幾何形状より全般的に流下方向に粗度接触部から頂部の間では加速、頂部から接触部の間では減速の傾向が強い。このため、粗度頂部では主流速が鉛直方向に一様化の傾向を持つ。一方、基準面を粗度頂部に設定した座標系では、粗度頂部近傍は $z_r = u_* z / \nu = 30$ より下層において粗度接触部に較べて相対的に固体境界面からの距離が短く粘性の影響が強く影響する。上記の様に、相対粗度の大きい浅水流においては粗度の幾何形状から生ずる流線の曲がりに伴う

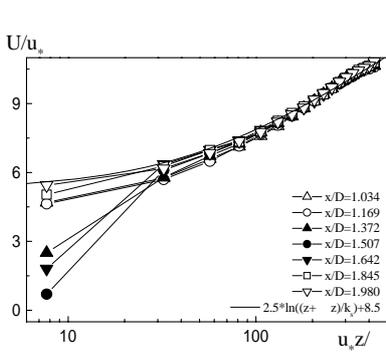


図 - 12 主流速Uの鉛直方向変化 (Case1)

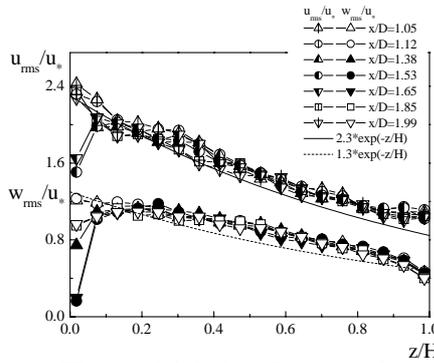


図 - 14 乱れ強さの鉛直方向変化 (Case1)

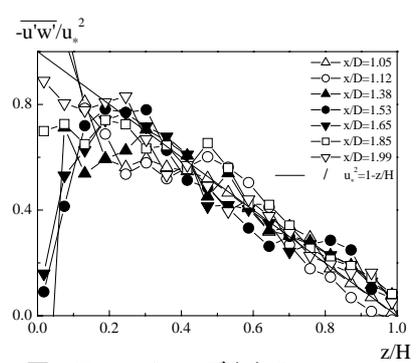


図 - 16 レイノルズ応力の鉛直方向変化(Case1)

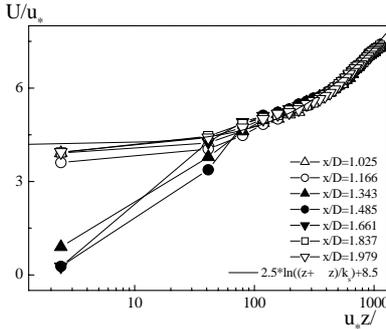


図 - 13 主流速Uの鉛直方向変化 (Case2)

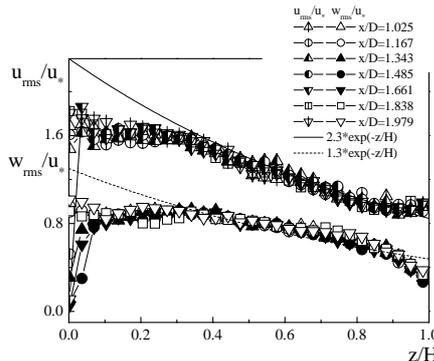


図 - 15 乱れ強さの鉛直方向変化 (Case2)

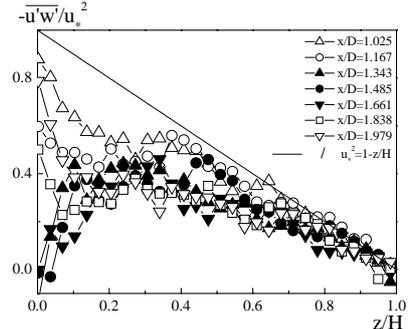


図 - 17 レイノルズ応力の鉛直方向変化(Case2)

加速・減速および粗度頂部の粘性底層の両者が粗度近傍の主流速の空間分布を特徴付けたことが考えられる。一般的に主流速および鉛直方向流速成分は、相対粗度が同じであれば、粗度のスケール効果は現れず、類似の傾向を示すことが認められる。また、粗度近傍では上昇流および下降流からも伺える様に移流に伴う物質輸送および運動量輸送が活発となることが認められた。

5. 乱流特性

粗度径15mmおよび粗度径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 - 14および15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⁽⁶⁾を示す。

一般的に乱れの強さ u_{rms}/u_* 、 w_{rms}/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、 u_{rms}/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ならず、一様化していることが認められる。

図 - 16および17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 $-u'w'/u_*^2$ は、粗度頂部近傍では粗度接触部の下降流域に較べて小さく、乱れによる運動量

輸送は小さいことが分かる。粗度径15mmでは、相対水深 $z/H=0.3$ より上層では図中に示されたせん断応力の直線分布との適合性は良好であるが、その下層では大きく異なる。従来指摘された粗度近傍におけるレイノルズ応力 $-u'w'/u_*^2$ 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、粗度端部では小さい。一方、粗度径30mmにおけるレイノルズ応力 $-u'w'/u_*^2$ は、 $z/H=0.4$ より上層ではせん断応力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变化が現れている。

主流速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 $\delta_R=D/3$ 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。

6. おわりに

本研究では、相対粗度が大きい球状粗度上の流れを、面計測が可能な粒子画像流速測定法を用いて測定した。Raupach等⁽¹⁵⁾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。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) Darcy-Weisbachの式を用いた抵抗係数 f の実測値は、完全粗面の対数則から得られる摩擦係数に較べて相対粗度が大きい場合には大きな値を取る傾向があり、無次元化されたManningの粗度係数は、相対粗度に依存することが明らかにされた。
- 2) 主流速は、粗度頂部からの無次元高さ $z_r = u_* z / \nu = 30$ 、より上層($z/D < 1/3$)では完全粗面の対数則で近似できるが、その下層では全般的に対数則分布に較べて相対的に小さく、その差はとくに粗度頂部近傍において大きい。その理由として、相対粗度の大きい浅水流においては粗度の幾何形状から生ずる流線の曲がりに伴う加速・減速および粗度に伴う粘性底層の両者が粗度近傍の主流速の空間分布を特徴付けることが考えられる。
- 3) 粗度近傍には安定した上昇流および下降流が形成され、その極大値は、各々、断面平均流速の4~8%および2~6%である。粗度近傍では移流に伴う物質輸送および運動量輸送が活発となることが示された。
- 4) 球状粗度におけるRoughness Sublayerの厚さは、 $\delta_r = D/3$ 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。
- 5) 粗度近傍におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ の直線分布からの欠損量は、Roughness Sublayerでは粗度頂部において大きく現れ、粗度接触部では相対的に小さい。
- 6) 乱れの強さ u_{rms}/u_* 、 w_{rms}/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持つ。鉛直方向にはRoughness Sublayerの外側で指数関数によ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、内側では粗度頂部近傍では過大評価され、その適合性は低く、一様化している。

参考文献

- 1) Bayazit, M.: Free Surface Flow in a Channel of Large Relative Roughness, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 14, pp. 115-126, 1976.
- 2) 神田徹, 土井和吉: 粗面乱流における浅い流れの抵抗則, 第25回水理講演会論文集, pp. 105-112, 1981.
- 3) Kellerhall, A.M.: stable channels with gravel-paved beds., J. waterw. Harbors Div., Am. Soc. Civ. Eng., 93. WWM1, 63-84.
- 4) J. ABERLE and G.M. SMART.: The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes,

- Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 41, No. 3, pp. 259-269, 2003.
- 5) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦: 相対水深の小さな流れ構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第423号, pp. 73-81, 1990.
- 6) Nakagawa, H., Tsujimoto, T. and Shimizu, Y.: Turbulent flow with small relative submergence, Proc. Int. Workshop on Fluvial of Mountain Regions, I.A.H.R., Trent, Italy, pp. A19-A30, 1989.
- 7) 禰津家久, 中山忠暢, 藤田正樹: 粒径の大きな粗度上の開水路流れと水面変動, 応用力学論文集, Vol. 1, pp. 709-718, 1998.
- 8) Nikora, V.I., Goring, D.G., and Biggs, J.F.: Some observation of effects of micro-organism growing on the bed of an open channel on the turbulence properties, J. Fluid Mech., Vol. 450, pp. 317-341, 2002.
- 9) Cooper J.R. and Tait. S.J.: The spatial nature of the near bed flow field over a naturally formed gravel bed, 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, Spain, Vol. 1, pp. 287-292, 2004.
- 10) Grass, A.J.: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, J. Fluid Mech., Vol. 50, part 2, pp. 233-355, 1971.
- 11) K.M. Singh & J.J.R. Williams: Direct Numerical of turbulent flow over a rough bed, Shallow Flows edited by Gerhard H. Jirka & Wim S. J. Uijttewaai, pp. 293-298, A.A. BALKEM PUBLISHERS, 2004.
- 12) THORSTEN STOESSER, WOLFGANG RODI and JOCHEN FROHLICH: LARGE EDDY SIMULATION OF OPEN-CHANNEL FLOW OVER A LAYER OF SPHERES, Proceedings of XXXI IAHR CONGRESS, pp. 1553-1560, 2005.
- 13) 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.
- 14) Ohmoto, T. & Hayashi, S.: STUDY ON GENERATION MECHANISM OF SECONDARY CURRENTS IN OPEN-CHANNEL FLOW BY DIRECT NUMERICAL SIMULATION, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 21, No. 1, pp. 11-21, 2003.
- 15) 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.
- 16) Iehisa Nezu, Hiroji Nakagawa: Turbulence in open-channel flows. IAHR. Balkema, 1993.

(2006.9.30受付)