# 開水路乱流に与える球状粗度の影響について

# 1. はじめに

粗面乱流については様々な研究がなされているが滑面 に比べその研究事例が少なく,相対粗度の大きな壁面近 傍,粗面近傍の空間変動については十分に把握されてい ない.著者らは粗面乱流の基本ともいえる球状粗度上の 流れに注目し,面計測が可能なPIV(Particle Image Velocimetry)法を用いて粗度近傍の流れの実態と鉛直成分 が主流速及び乱れ特性に与える影響を検討し,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.

本研究では、水深に対する粗度の相対的大きさを系統 的に変化させ,相対粗度が0.1,0.3,0.5 および0.8の4ケース において、フルード数0.5の常流における平均流および乱 れ特性に与える相対粗度の影響を詳細に検討した.

## 2. 実験方法

実験に使用した水路は,長さ10m,幅40cm,高さ20 cm の可変勾配型の循環式直線水路である.計測部は,側壁 からレーザー光が照射可能なように全面がアクリル製と なっている.実験条件を表-1 に示す.計測対象領域の座 標系は,図-1に示すように,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,変動流速 成分を u', v', w' とする.

水路床は,直径 15mm および直径 0.5mm のガラス球を 水路上流端より 2m 位置から流下方向に長さ 3m に亘り最 充填密度で 2 層に敷き詰めた.粗面の表層配列を,図-2



図-1 実験装置図

熊本大学大学院	学生会員	○馬場	太郎
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	田中	貴幸

に示す. 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.

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.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.計測シ ステムの概要を図-1 に示す.

## 3. 実験結果とその考察

図-3および図-4は、各々、相対粗度0.3および0.8 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.

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

ここに、 $u_*$ : 摩擦速度、 $\kappa = 0.41$ : カルマン定数、 $\Delta z$ は 粗度頂部からの原点補正量、 $k_s$ は粗度長である. 原点補正 量および粗度長は実験値との適合性から、 $k_s = 0.55D$ およ び $\Delta z=0.15D$ を選択した.粗度長は、禰津等の $k_s=0.57D$ に近 く、Grass<sup>1)</sup>等の $k_s=0.68D\sim0.82D$ に較べて若干小さい. ま た、原点補正量は、従来の $\Delta z=(0.15\sim0.3)D$ の範囲に在り 下限値に近い.

主流速は,粗度頂部からの無次元高さz<sub>+</sub>=u<sub>\*</sub>z/ν=30より 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<sub>+</sub>=u<sub>\*</sub>z/v=30より下層において粗度接触部に較べて相対

(---- 計測線)



図-2 粗面の表層配列

	相対粗度	平均流速	水深	勾配	アスペクト比	フルード数	レイノルズ数	粗度レイノルズ数		
	D/H	U <sub>m</sub> (cm/s)	H(cm)	Io	B/H	$U_{m}/(gH)^{1/2}$	$U_mH/\nu$	u*D/ v		
Case1	0.1	35	5	1/1000	8	0.5	17500	332		
Case2	0.3	35	5	1/500	8	0.5	17500	470		
Case3	0.5	27	3	1/500	13.3	0.5	8100	365		
Case4	0.8	22	1.86	1/300	21.5	0.5	4092	371		

実験条件

表 — 1



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 間分布を特徴付けたことが考えられる.

鉛直面内の主流速変動u'および鉛直流速変動w'の乱 流特性を図-5~8に示す.著者ら2)により全般的に流下方 向にはレイノルズ応力 $-u'w'/u_*$ ,乱れの強さ u<sub>ms</sub>/u<sub>\*</sub>, w<sub>ms</sub>/u<sub>\*</sub> は粗度近傍の上昇流域で極小値,粗度接触 部の下降流域で極大値を取る傾向を持つことがわかって おり, 図-5 および図-6 から相対粗度 0.3 においてはバ ラツキがかなり大きいがレイノルズ応力 -<u>u'w'</u>/u<sup>2</sup>は,粗 度頂部近傍の上昇流域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わかった. また,相対粗度 0.8 においては,相対水深z/H=0.1 より上 層では図中に示されたせん断力 τ 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  $-\overline{u'w'}/u^2$  の直線分 布からの欠損2)は、粗度頂部において見られる現象であり、 粗度接触部の下降流域では流下方向に平衡状態のせん断 力よりもむしろ大きくなり、運動量輸送は活発であること がわかる.

図-7および図-8から乱れの強さu<sub>ms</sub>/u<sub>・</sub>は全般的には 図中の実線で示された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ことがわかる.但し、粗度近傍の粗度近傍の相対水深 z/H=0.1 より下層では粗度頂部付近の上昇流域において特に小さくなることが認められる. 乱れの強さ $w_{ms}/u_{\cdot}$ は、全般的に上層域では禰津等の提唱する乱れ強度式の値に較べて若干大きくなることが分かる.

一方,下層ではu<sub>ms</sub>/u<sub>\*</sub>と同様に粗度頂部付近の上昇流 域において急減することが認められる.

### 4. おわりに

今回の実験は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.

今回は相対粗度0.3および0.8について比較検討したが、 次は相対粗度を系統的に変化させた流れの特性量と粗度 による影響について検討していきたい.

#### 参考文献

- 1) Grass,A.J: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries , J. Fluid Mech. ,Vol.50, part2, pp.233-255, 1971
- 2) 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
- (補津博次, 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
- 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