

相対粗度の大きい粗面乱流の組織的構造

熊本大学工学部 学生会員 ○馬場 太郎
 熊本大学大学院 学生会員 柿原 ゆり
 熊本大学工学部 正会員 大本 照憲
 熊本大学工学部 正会員 矢北 孝一

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。そこで本研究で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た。

2. 実験方法

実験は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 20cm の可変勾配型の循環式直線水路を使用した。計測部は、壁面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。座標系は、流下方向を x 軸、縦断方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、それぞれに対応した流速成分を u' 、 v' 、 w' とする。図 - 1 に概略図を示す。PIV 法によって処理された。実験には礫を模擬したガラス球 ($D=1.5\text{cm}$) を使用し、水路の上流端より 2m の位置から流下方向に長さ 3m に亘り最充填密度で 2 層に敷き詰めた相対粗度 0.3、0.5、0.8 それぞれで Ridge Line (峰) と Trough Line (谷) を計測した。図 - 2 に河床境界を示す。相対粗度は各ケースの水深で除した D/H とした。光源には YAG レーザーを用い、シート光の厚さは 1mm、パルス間隔を $500\mu\text{s}$ に設定し、1 計測断面での画像データは 1000 枚、計測時間は、33.3sec であった。なお、トレーサーとして粒径 $30\mu\text{m}$ 、密度 1.02 のナイロン粒子を使用した。レーザーと 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)、 $960 \times 1018(\text{pixel})$ のモノクロビデオ画像としてパソコンのハードディスクに記録される。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。なお、表 - 1 における摩擦速度は、 $u_* = \sqrt{gHI_0}$ により算定した。計測点近傍のガラス球はレーザー光の反射を防ぐためスプレーで黒に着色した。流れは所定の流量を通水し下流端の堰を調節することで等流とした。レンズは撮影領域が 50mm 以上に対して、焦点距離が 50mm、撮影領域が 20mm 以下に対して焦点距離が 200mm のものを使用した。

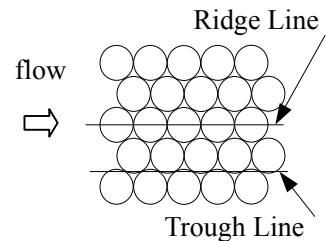


図 - 2 河床境界条件(平面図)

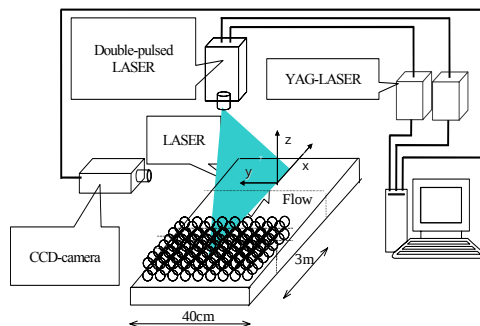


図 - 1 計測システムの概略

		Case1	Case2	Case3
平均流速	$U_m(\text{cm/s})$	35.0	26.3	35.0
水深	$H(\text{cm})$	5.0	3.0	1.88
勾配	I_0	1/500	1/500	1/178
アスペクト比	B/H	8	13.3	21.2
フルード数	$U_m/(gH)^{1/2}$	0.5	0.5	0.8
レイノルズ数	$U_m H/\nu$	17500	7800	6500
粗度レイノルズ数	$u_* D/\nu$	470	363	483
相対粗度	D/H	0.3	0.5	0.8

3. 実験結果 図 - 3 は Case 1 の相対粗度 0.3 における Ridge Line 上の鉛直成分 W の流下方向変化を示す。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ていることが認められる。また、上昇流はその極大値が約 1.5cm/s であり、下降流に比べて狭い領域で強い値を示す傾向を持つことがわかる。図 - 4 は 200mm レンズを用いた PIV 計測によって空間分解能を

高め、鉛直成分 W の一粒径間の流下方向を更に詳細に示したものである。 x 軸は頂部からの距離と半径 $D/2$ との関係から $\psi = (x - x_{top}) / (D/2)$ で表現している。鉛直成分 W は、ガラス球頂部の上流側では上昇流、頂部下流側では弱い下降流である。また、上昇流は、その極大値が断面平均流速の約 8% であり、縦筋河床や矩形断面水路の二次流が数%であるのに対して大きな値であること、極大値の発生位置はガラス球頂部の $D/8$ 上流側にあることが認められる。図 - 5 に鉛直流速成分 W の鉛直方向変化を示す。流下方向に極大値を示した、 $x = 0.59\text{cm}$ において上昇流は、ガラス球の壁面近傍で極大値を取り、鉛直方向に一樣に低下する傾向を示す。下降流も同様に、壁面付近で極大値を取り、一樣に低下する傾向を有する。上昇流および下降流ともに、ガラス球頂部より $D/3$ ($z = 5\text{mm}$) 以上の上層では、ゼロに近いことがわかる。図 - 6 はレイノルズせん断応力を示す。これは Ridge Line 上においては壁面近傍で大きな変動を示し、ガラス球の頂部で極小値、谷部で極大値を示し、波長が粒径 D 、波高が u_*^2 の正弦波に近い規則的の分布形であることがわかる。図 - 7 に示す乱れの強さ u_{rms}/u_* は、 $-u'w'/u_*^2$ と同様に流下方向に大きく変動し、ガラス球頂部で極小値、谷部で極大値を示し、波長が粒径 D 、波高が $0.5 u_*$ の正弦波に近い規則的の分布形であることが分かる。

4. おわりに

今回の実験で、粗度近傍に安定した規則性の高い上昇流及び下降流の存在することが見出され、上昇流の極大値は断面平均流速の約 8% であり、その位置は球頂部の $D/8$ 上流位置である。主流速も、粗度近傍においては球状粗度に沿って流下方向に規則性の高い波状性を示し、Ridge Line 上では粗度頂部の直上流側で強い加速域、下流側で減速域が認められ、流速変動幅は断面平均流速の約 10% に達した。また、鉛直方向には加速域で一様化の傾向を示し、減速域では壁面に向けて急減する。レイノルズせん断応力および乱れ強さは、Ridge Line 上においては流下方向に大きく変動し、粗度頂部で極小値、谷部で極大値を取り、波長が粒径 D の正弦波に近い規則的の波形を示した。

参考文献：1) 禰津家久, 中山忠暢, 藤田正樹：粒径の大きな粗土上の開水路流れの乱れと水面変

動, 応用力学論文集, 第 1 巻, pp.709-718, 1998.

2) Nakagawa, H., Tsugimoto, T. and Shimiz, 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

3) 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の乱れと水面変動, 応用力学論文集, Vol. 1, pp. 709-718, 1998

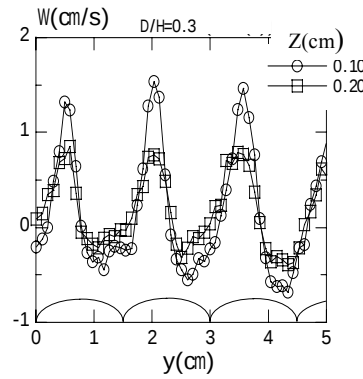


図 - 3 鉛直流速成分 W の流下方向変化

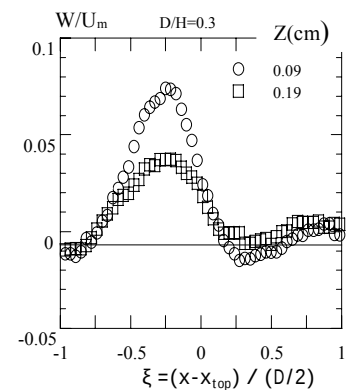


図 - 4 鉛直流速成分 W の流下方向変化

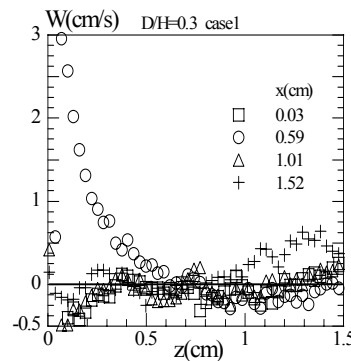


図 - 5 鉛直流速成分 W の鉛直方向変化

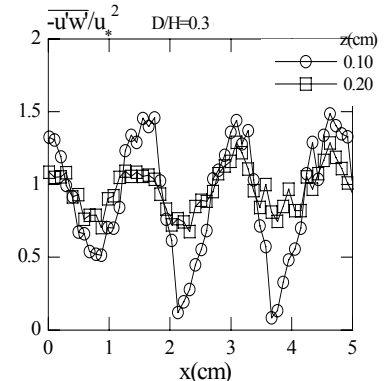


図 - 6 $-u'w'/u_*^2$ の流下方向変化

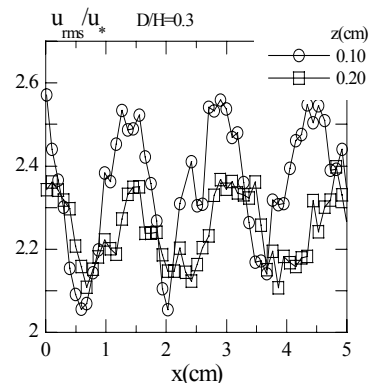


図 - 7 u_{rms}/u_* の流下方向変化