

相対粗度の大きい開水路流れの 乱流特性について

TURBULENT CHARACTERISTICS OF SHALLOW FLOW OVER ROUGH SURFACE WITH REGULARLY ARRAYED SPHERES

大本照憲¹・柿原ゆり²・崔志英³

Terunori OHMOTO, Yuri KAKIHARA and Zhiying CUI

¹工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

²熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (同上)

³熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (同上)

Turbulent nature of near-bed flow field was investigated in an open channel over a rough-bed artificially arrayed with glass beads, where ratios of the glass diameter to flow depth are 0.3, 0.5 and 0.8. Detailed spatial measurements of streamwise and vertical velocity fluctuations were made using Particle Image Velocimetry (PIV) in a vertical plane along the completely rough bed surface. Results indicated significant degrees of spatially regular variation in the time-averaged velocities, in which the upflow generated over upper region of roughness top is about 8% of the cross sectional average velocity, much stronger than the downflow. 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 suggested to be due to the vortex shedding brought about by the roughness elements.

Key Words : turbulence, open-channel shallow flow, large relative roughness, PIV

1. はじめに

粗度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、地表や路面上の流れ、急勾配水路流れおよび護岸上の流れ等において観察される。従来、粗度の大きな流れは、水工学の分野では治水や利水上の観点から、抗力や抵抗則に関わる応用的研究¹⁻²⁾および平均流特性や乱流構造の基礎的研究³⁻⁶⁾、現地調査⁷⁾が主であったが、近年では河川環境再生の視点からの研究⁸⁾も見られる。

しかしながら、粗面乱流に対する直接数値シミュレーションは、境界条件の設定に工夫を凝らした研究⁹⁾も見られるが、一般にその設定が極めて困難なことから滑面乱流に較べて研究事例も少なく、粗度近傍における流れの詳細については不明な点が多く残されている。

本研究が対象とする相対水深の小さい流れについては中川等^{11,12)}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。

瀬津等¹²⁾は、レーザ流速計による計測結果から、粒径の大きな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評価している。

Nikora 等⁸⁾は、球状粗度上に付着藻類が発生した開水路流れにおいて、超音波流速計を用いて流れの計測を行い、生物膜と粗度近傍の流れの相互作用について検討し、生物膜は粗度長さを 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を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分布を顕著に変化させず、全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指摘している。

Cooper 等¹³⁾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。

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。

本研究では、礫床流れを考える上で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計法

(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が見出された。本論では、粗度近傍の流れの実態とこの鉛直平均流速が主流速および乱れ特性に与える影響を検討した。

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。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のガラス球を水路上方より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。粗面の表層配列は、図-2に示す様にガラス球の峰部を連ねた線と谷部を連ねた線が各々流れに平行なB.C.(1)および直交するB.C.(2)の2ケースを考え、実験条件がCase1では両者を、Case2およびCase3ではB.C.(1)のみを対象とした。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。なお、表-1における摩擦速度は、

$$u_* = \sqrt{gHI_0} \text{ により算定した。}$$

測定位置は、ガラス球の粗面先端より2.5m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。

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、xz平面を計測する場合は水路上方から底面に垂直下向きに、xy平面を計測する場合は水路側方から側壁に水平に照射した。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と200mmの2種類を用い、前者には撮影領域が50mm以上に対して、後者には隣近傍を詳細に捉えるために撮影領域が15mm以下に対して使用した。ここに、画像の1pixel

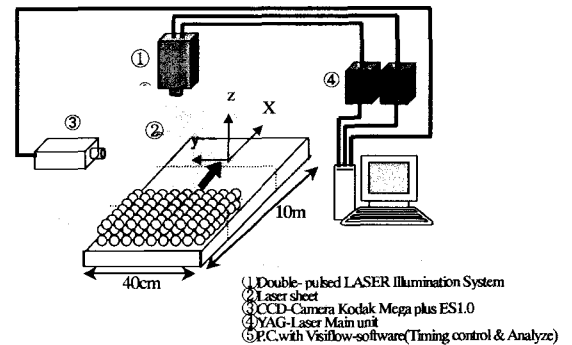


図-1 流れの計測システム

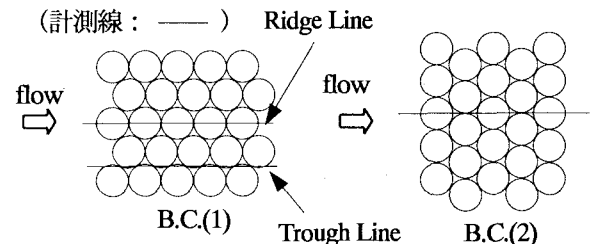


図-2 河床境界条件

の最小サイズは、50mmレンズで0.06mm、200mmレンズで0.016mm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、トレーサとして粒径30 μ m、比重1.02のナイロン粒子を使用した。

3. 平均流速特性

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-3～14に示す。なお、鉛直座標軸zの原点は、中川等と同様の方法を取り、幾何学的に明瞭に設定できる粗度頂部を基準面とした。

図-3および4は、各々、Case1の相対粗度0.3およびCase3の相対粗度0.8において河床境界条件B.C.(1)におけるRidge Line上の鉛直方向成分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、下降流に較べて狭い領域で強い値を示す傾向を持つことが分かる。

図-5は、Case1の相対粗度0.3において河床境界条件B.C.(1)におけるTrough Line上の鉛直方向成分Wの流下方向変化を示す。Trough Line上の鉛直方向成分Wは、Ridge Line上の様に明瞭な規則性は示さず、全般的に弱い下降流である。

図-6は、Case1の相対粗度0.3において河床境界条件B.C.(2)におけるRidge Line上の鉛直方向成分Wの流下方向変化を示す。鉛直方向成分Wは、河床の周期的長さ2.73Dと対応した規則性を示し、図-3および4の河床境界条件B.C.(1)のケースと同様に、ガラス球頂部の直上流側で上昇流が発生し、頂部より下流側の広い範囲で下降流となることが認められる。

河床のごく近傍ではあるが、安定した規則性の高いこれらの上昇流は、ガラス球周辺の局所的圧力場と剥離渦

表-1 実験条件

	Case1	Case2	Case3
平均流速 U_m (cm/s)	35.0	26.3	35.0
水 深 H (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

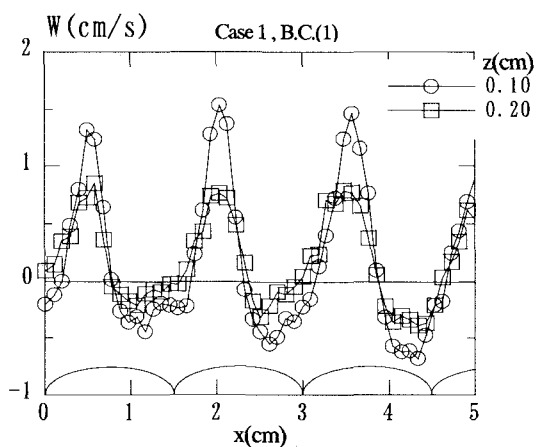


図-3 鉛直流速成分Wの流下方向変化 (Ridge Line)

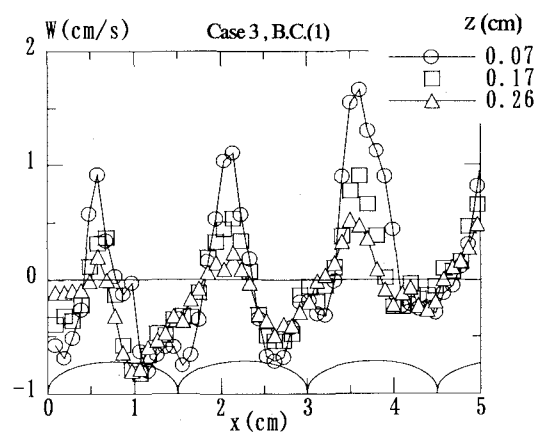


図-4 鉛直流速成分Wの流下方向変化 (Ridge Line)

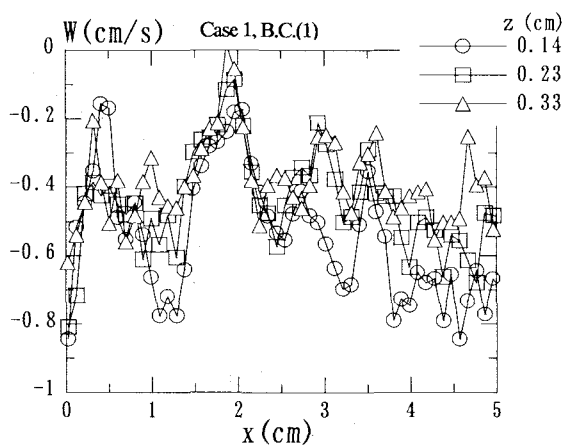


図-5 鉛直流速成分Wの流下方向変化 (Trough Line)

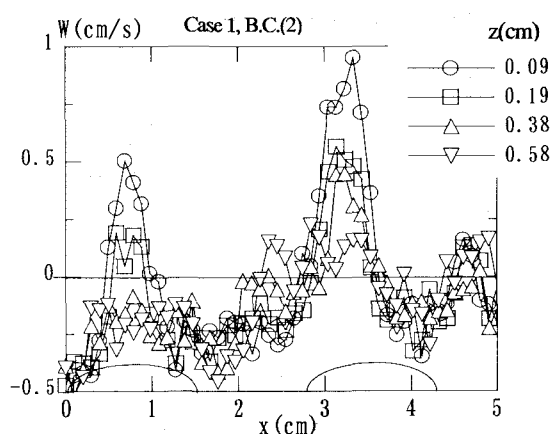


図-6 鉛直流速成分Wの流下方向変化

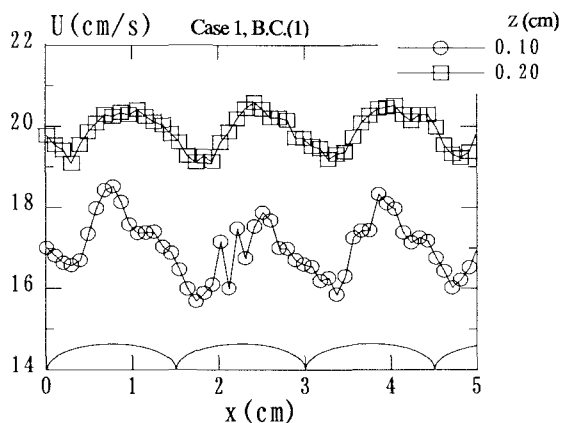


図-7 主流速Uの流下方向変化 (Ridge Line)

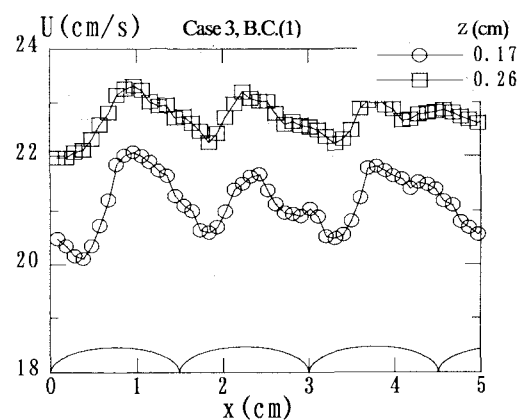


図-8 主流速Uの流下方向変化 (Ridge Line)

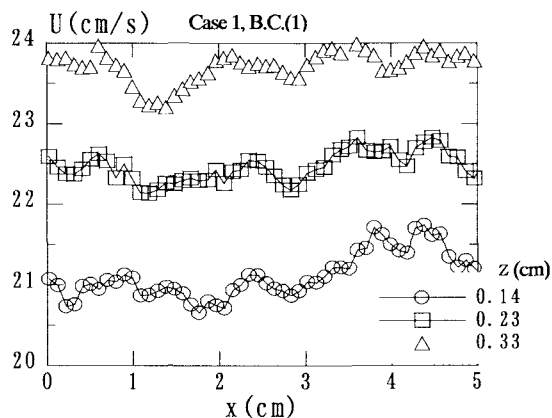


図-9 主流速Uの流下方向変化 (Trough Line)

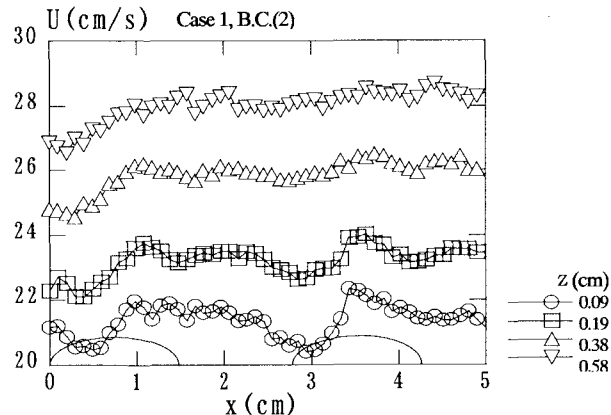


図-10 主流速Uの流下方向変化

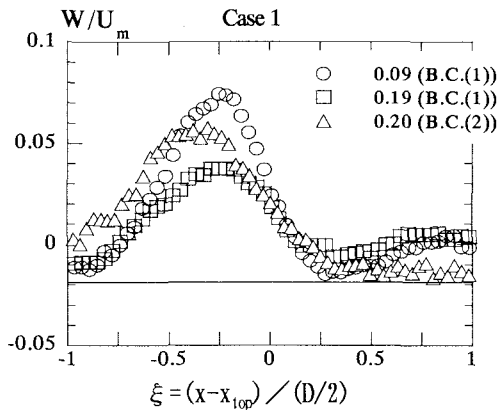


図-11 鉛直流速成分Wの流下方向変化

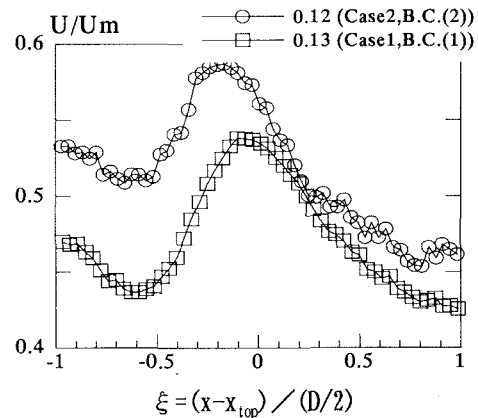


図-12 主流速Uの流下方向変化

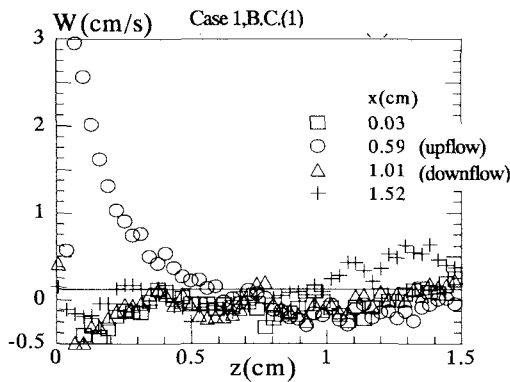


図-13 鉛直流速成分Wの鉛直方向変化

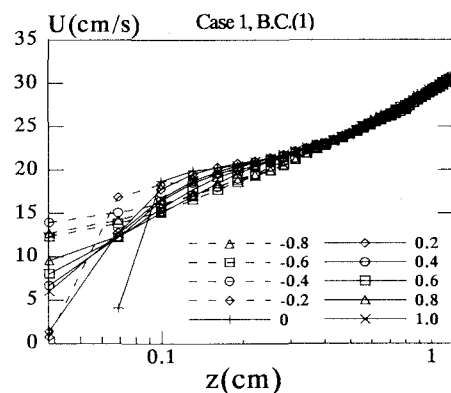


図-14 主流速Uの鉛直方向変化

との関係が深いことが予想される。

図-7 および 8 は、各々、Case1 の相対粗度 0.3 および Case3 の相対粗度 0.8 において河床境界条件 B.C. (1) における Ridge Line 上の主流速 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、ガラス球頂部の直上流で極大値を示し、その位置が上昇流の発生位置に近いことが読み取れる。一方、主流速の極小値は、上昇流極大値の発生位置より若干上流側に位置し、全般的に低速域は下降流域であることから、縦筋河床上の流れ¹⁴⁾とは大きく異なることが分かる。

図-9 は、Case1 の相対粗度 0.3 において河床境界条件 B.C. (1) における Trough Line 主流速 U の流下方向変化を示す。主流速は、Trough Line 上では鉛直流速成分 W と同様に、明瞭な規則的波状性は無く、流下方向に変化は小さい。

図-10 は、Case1 の相対粗度 0.3 において河床境界条件 B.C. (2) における Ridge Line 上の主流速 U の流下方向変化を示す。主流速 U は、図-7 および 8 の河床境界条件 B.C. (1) のケースと同様に、明瞭な規則的波状性を示し、ガラス球頂部近傍で極大値となり、下降流域では低速となることが認められる。

図-11 および 12 は、200 mm レンズを用いた PIV 計測によって空間分解能を高め、主流速 U および鉛直流速成分 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。鉛直流速成分 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。

一方、主流速は、鉛直流速成分 W に類似の流下方向変化を示し、その極大値がガラス球頂部の $D/8$ 上流側近傍に位置し、主流速の流下方向変化量はガラス球頂部より約 1mm の高さでは、断面平均流速の 10 % 程度である。

図-13 および 14 は、各々、Case1 の相対粗度 0.3 において河床境界条件 B.C. (1) における Ridge Line 上の鉛直方向成分 W および主流速 U 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、ゼロに近いことが分かる。主流速 U は、壁面近傍では、上昇流の発生域では下降流の発生域に較べて相対的に大きく、その差は鉛直上方に小さくなり、鉛直流速成分 W と同様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。図-12 との比較から主流速は、加速域においては鉛直方向に一樣化の傾向を示すが、減速域においては壁面付近で大きく変化することが認め

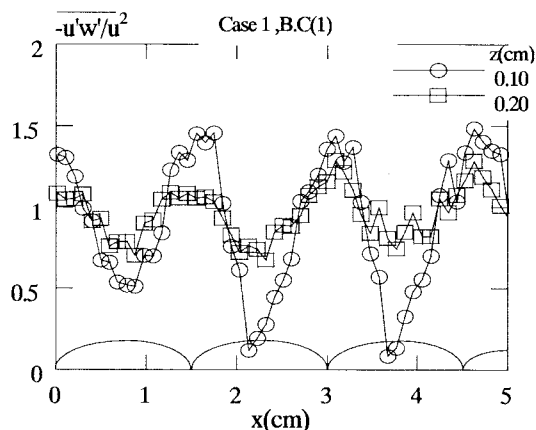


図-15 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化 (Ridge Line)

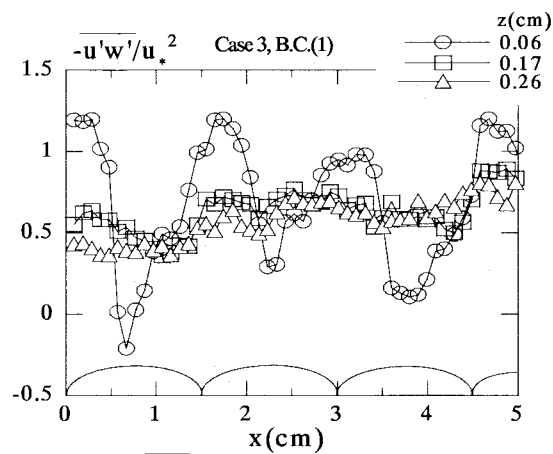


図-16 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化 (Ridge Line)

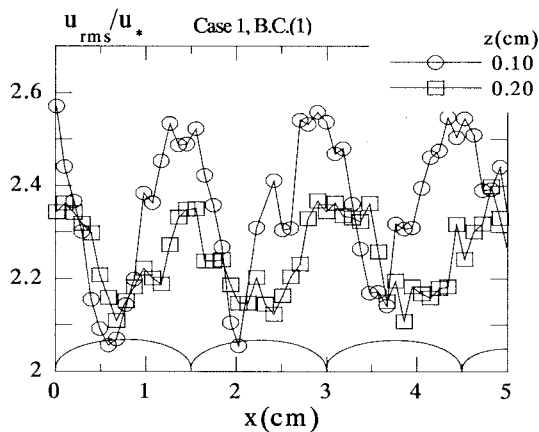


図-17 u_{rms}/u_* の流下方向変化 (Ridge Line)

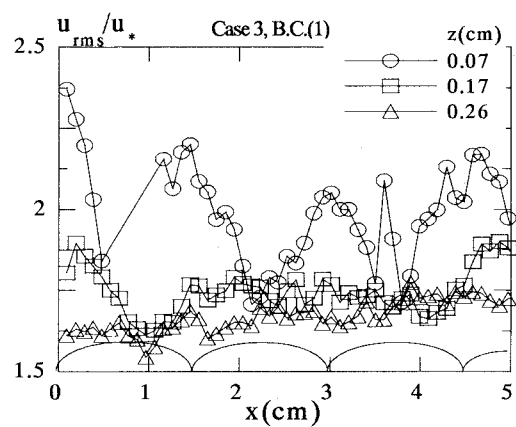


図-18 u_{rms}/u_* の流下方向変化 (Ridge Line)

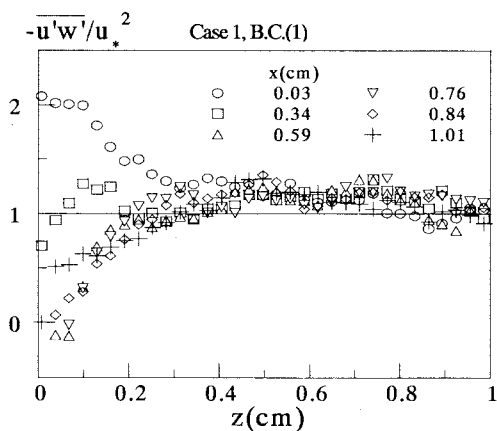


図-19 $-\overline{u'w'}$ の鉛直方向変化 (Ridge Line)

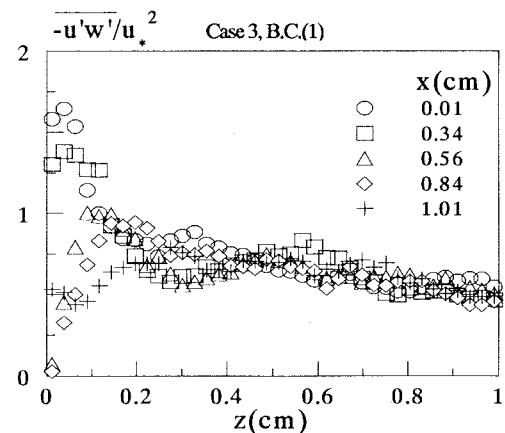


図-20 $-\overline{u'w'}$ の鉛直方向変化 (Ridge Line)

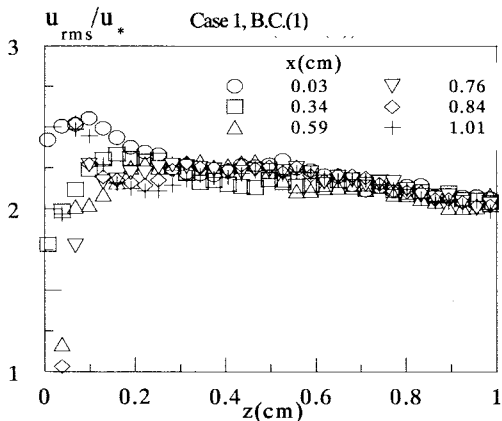


図-21 u_{rms}/u_* の鉛直方向変化 (Ridge Line)

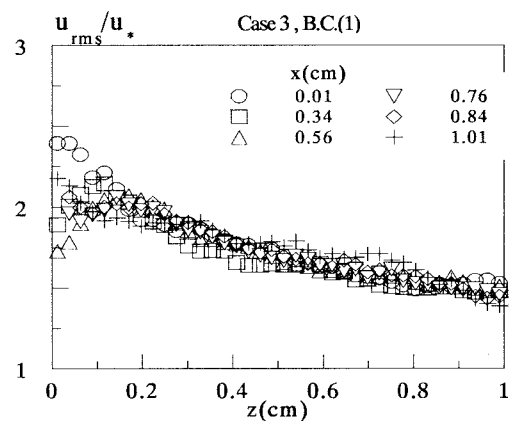


図-22 u_{rms}/u_* の鉛直方向変化 (Ridge Line)

られる。また、このD/3以上の上層では、対数則が成立することが認められる。

4. 乱流特性

河床境界条件B.C.(1)におけるRidge Line上のレイノルズせん断応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ および乱れの強さ u_{rms}/u_* の流下方向変化を図-15~18に示す。

図-15 および 16 より、レイノルズせん断応力は、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 $0.5 u_*^2$ の正弦波に近い規則的分布形であることが認められる。

乱れの強さ u_{rms}/u_* は、 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ 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分布形であることが分かる。

レイノルズ応力および乱れの強さは、縦筋河床上において観察された結果¹⁴⁾とは異なり、上昇流部近傍で小さく、下降流部近傍で大きな値を示している。これは、図-12から認められる様に、粗面近傍ではガラス球頂部からD/4上流域では強い加速域、その下流域は減速域であることから、粗度によって形成された圧力場の影響を強く受けたことが読み取れる。

図-19~22は、河床境界条件B.C.(1)におけるRidge Line上のレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ および乱れの強さ u_{rms}/u_* の鉛直方向変化を示す。図-19および20より、レイノルズせん断応力は、流下方向変化には、Ridge Line上の谷部で大きく峰部で小さい、鉛直方向には粗度から離れるに従って谷部では減衰し、峰部では逆に増大し、 $z=5\text{mm}$ 程度では谷部と峰部において顕著な差は無いことが分かる。

図-19および21から、レイノルズせん断応力および乱れの強さは、Case1のRidge Line上で上昇流の極大値が発生した流下距離 $x=0.59\text{cm}$ および下降流の極大値が現れた $x=1.01\text{cm}$ において、両者に顕著な変化は無く、このことは図-20および21からも伺える。

粗度近傍におけるレイノルズせん断応力および乱れの強さの非一様性は、概ね $z<0.5\text{cm}$ ($=D/3$) 以下の粗度近傍で顕著であり、楠津等¹²⁾の結果とも一致している。

5. おわりに

本研究では、礫床流れを考える上で基本とも言える球状粗度上の流れを、面計測が可能な粒子画像流速計法を用いて測定した。Raupach等⁶⁾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以下の様な特性のあることが明らかにされた。

- 1) 水深に対する粗度の大きさが0.3, 0.5 および0.8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。

- 2) 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。
- 3) レイノルズせん断応力 $-\overline{u'w'}/u_*^2$ および乱れの強さ u_{rms}/u_* 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波形を示した。

参考文献

- 1) 神田徹, 鈴木勝士: 球状粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第357号, pp.65-74, 1985
- 2) 吉川秀夫, 植松龍二, 城 衛, 関根正人: 球状粗度上の速度分布とそれに働く流体力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第399号, pp.47-54, 1988
- 3) Grass, A.J.: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, J. Fluid Mech., Vol.50, part2, pp.233-255, 1971
- 4) 楠津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文集, 第261号, pp.67-76, 1977
- 5) 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
- 6) Raupach, M.R., Thom, A.S. and Edwards, L.A.: A wind tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surface, Boundary-Layer Meteorol., 18, pp.373-397, 1988
- 7) Roy, A.G., Buffin-Belanger, T., Lamarre, H. and Kirkbride, A.D.: Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river, J. Fluid Mech., Vol.500, pp.1-27, 2004
- 8) Nikora, V.I., Goring, D.G. and Biggs, J.F.: Some observation of the 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) 中山昭彦, 崎尾幸司: 波状粗面上乱流の直接数値シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.6, pp.839-846
- 10) 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
- 11) Nakagawa, H., Tsugimoto, 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
- 12) 楠津家久, 中山忠信暢, 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
- 13) 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
- 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, Vol.21, No.1, pp.11-21, JSCE, 2003

(2004.9.30 受付)