

浮遊砂流の流速分布と乱流変調に及ぼす 壁面粗度の影響

EFFECTS OF WALL ROUGHNESS ON VELOCITY DISTRIBUTION AND TURBULENCE MODULATION IN SUSPENDED SEDIMENT OPEN-CHANNEL FLOWS

東良慶¹・禰津家久²

Ryoukei AZUMA and Iehisa NEZU

¹ 学生員 工(修) 京都大学大学院 博士後期課程 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

² フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻

Suspended sediment in open-channel flows has been paid great attention in river engineering. It has been pointed out that flow resistance is changed by the existence of sand particles. Moreover, knowledge of interaction between sand-particles (solid-phase) and water (fluid-phase) is necessary to improve sediment transport rate formula. However, the mechanism of particle-fluid interactions is not fully understood. In this study, simultaneous measurements were conducted with discriminator PTV in rough open-channel flows with suspended sediment. The roughness elements were set up on the channel-bed. Consequently, the relative velocity between particles and fluid and the turbulence modulation were investigated by changing the particle concentration systematically.

Key Words : *suspended-sediment flow, roughness, simultaneous measurements, PTV.*

1. はじめに

流砂を伴う流れに関する研究は、従来からその流れの抵抗則が変化することや、より高精度な流砂量公式への改良などを行うために注目されてきた。しかし、これらを行うには、水流(液相)・流砂(固相)間の相互作用に関する知見が必要となる。そこで壁面乱流における砂粒子の挙動およびその影響に関する実験が従来から行われてきた。流砂輸送に関する初期の研究では、流体の主流速分布におけるカルマン定数の変化が注目され、また、拡散理論による流砂濃度分布式も提案されてきた¹⁾。しかし、これらの研究では通常、粒子挙動を流体の平均流特性の変化から経験的に推測しており、より高精度な流砂輸送モデルを構築するためには、粒子・流体間の相互作用の本質的な特性を把握する必要がある。

以上のような背景から粒子を伴う流れの粒子と流体の両相を同時計測する実験の必要性が認識され、近年行われるようになった²⁾。その結果、流体の流速分布の変化や粒子・流体間の速度差が指摘された。粒子を伴う開水路流に関する研究では粒子の影響について、対数則が成立しない領域と対数則が成立する領域に着目した 2 つの研究グループに大別できる。

前者の外層に関する研究では、Itakura & Kishi³⁾は粒子の存在によってウエイク強度パラメータ Π が変化することを指摘した。Cellino & Graf⁴⁾も粒子濃度に伴い Π 値の増加を主張しているが、Valiani⁵⁾はその逆となると指摘し、この変化量は粒子濃度の高い内層近くがより大きくなるとしている。この Π 値の変化量に関しては、いまだ一致した見解は得られていないが、これら外層の変化は粒子濃度の大きい内層からの影響が起因していると考えられている。

一方、内層に関する研究では、Best *et al.*²⁾、Muste & Patel⁶⁾が粗面流れにおいて粒子と流体の同時計測を行い、流体の速度分布が清流のものと比較して下方に平行シフトする低減効果を指摘している。ところが滑面流れで同時計測を行った Kulick *et al.*⁷⁾、Kaftori *et al.*⁸⁾、Nezu & Azuma⁹⁾の実験では清流との間には顕著な変化が見られなかった。Best *et al.*²⁾、Muste & Patel⁶⁾はこの平行シフトの原因は粒子との相互作用の影響ではなく、むしろ壁面の粗度効果の影響とみなした。しかし、粒子・流体間の相互作用が流速分布に影響しないとは考え難い。なぜならこの相互作用が、粒子の輸送機構における粒子と流体間の運動量交換に密接に関係しているからである。壁面領域

表-1 水理条件および解析結果

シリーズ F02 (粗度 $k_s=0.2\text{mm}$, $k_s^+ \approx 5$)

Case	d_p (mm)	ρ_p (g/cm ³)	k_s (mm)	h (mm)	U_m (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr	U_* (cm/s)	κ	R_* $\equiv U_* h/\nu$	k_s^+	$\overline{C}$ $\times 10^{-5}$
CW6	—	—	0.2	40.0	49.2	1.97	0.79	2.46	0.412	984	4.92	—
F02-a	0.2	2.60						2.48	0.399	992	4.96	1.73
F02-b								2.50	0.391	1000	5.00	4.64
F02-c								2.54	0.386	1016	5.08	12.45
F02-d								2.56	0.378	1024	5.12	20.21
F02-e								2.56	0.376	1024	5.12	28.14

シリーズ F08 (粗度 $k_s=0.8\text{mm}$, $k_s^+ \approx 20$)

Case	d_p (mm)	ρ_p (g/cm ³)	k_s (mm)	h (mm)	U_m (cm/s)	Re $\times 10^4$	Fr	U_* (cm/s)	κ	R_* $\equiv U_* h/\nu$	k_s^+	$\bar{C}$ $\times 10^{-5}$
CW7	—	—	0.8	40.0	47.3	1.89	0.76	2.48	0.411	992	19.8	—
F08-a	0.2	2.60						2.49	0.398	996	19.9	1.34
F08-b								2.51	0.393	1004	20.1	4.44
F08-c								2.52	0.384	1008	20.2	10.76
F08-d								2.54	0.381	1016	20.3	17.62
F08-e								2.56	0.379	1024	20.5	25.58

における混相流計測が困難なことから、このような粒子・流体間の相互作用などには不明な点が多い。

以上のような背景から、本研究では粗面開水路における浮遊砂流を対象として、平均流特性や周囲流体の乱流特性、すなわち乱流変動に及ぼす粒子／流体間の相互作用について、粒子濃度を系統的に変化させ検討した。また、その相互作用に及ぼす壁面粗度の影響について考察した。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本実験で使用した水路は、長さ 4m、幅 5cm で、側壁および底面全体がアクリル製の循環式直線水路である。ガラス球をアクリル板に貼り付けたものを水路床全域に設置した。なお、固定したガラス球には 0.2mm および 0.8mm を用い、粗度高さ k_s が異なる 2 シリーズの実験を行った。計測断面は上流端から 3m 下流である。座標系としては流下方向に x 軸、 x 軸に直角上向きに y 軸をとり、それぞれの瞬間流速値を $\vec{u} = U + u$ および $\vec{v} = V + v$ とした。ここに、大文字は時間平均流速で小文字は乱れ変動成分である。流体（水）および固体粒子の諸量については添字 f および p を付加して表示する。側壁は水理学的滑面であり、粒子は再循環して、河床に堆積しない水理条件とした。また、粒子投入後、粒子濃度および流れ場が安定平衡するまで約 1 時間循環させ、その後計測を行った。

PTV 撮影は水路側壁付近に設置された CCD カメラで行われ、光ディスクに 512×480 ピクセルのフレーム画像を 1/30s ごとに記録した。なお、本計測システムは Nezu & Azuma⁹⁾の PTV 計測と同様であり、また、実験水路については文献 10)を参照願いたい。

(2) 水理条件

実験条件を表-1 に示す。本研究においては浮遊粒子として、粒径が 0.2mm のガラス球を用いた。また、水路床の粗度として直径 0.2mm と 0.8mm の 2 種類のガラス球を用いた。それらをシリーズ F02 およびシリーズ F08 とし、それぞれのシリーズにおいて、粒子濃度を系統的に変化させた 5 ケースの計測を行った。CW6, CW7 は粒子を伴わない流れ、すなわち清流(Clear Water)である。表中の d_p は対象粒子の粒径、 ρ_p は粒子の密度(以下では比重という)、 k_s は粗度高さ、 h は水深、 U_m は断面平均流速、 $Re \equiv U_m h / \nu$ はレイノルズ数、 $Fr \equiv U_m / \sqrt{gh}$ はフルード数、 ν は流体の動粘性係数、 g は重力加速度、 U_* は摩擦速度（算出方法は後述する）である。 $R_* = U_* h / \nu$ は摩擦レイノルズ数、 $k^+ = k U_* / \nu$ は粗度レイノルズ数、 $\bar{C}$ は水深平均した粒子体積濃度である。

本研究では、それぞれのシリーズにおいて流量 Q および水深 h を全ケースにわたり一定とし、粒子濃度を系統的に変化させた。その結果、粒子・流体間の相互作用に及ぼす粒子濃度の影響を評価することができると考えられる。なお、流体挙動に追従し、流速を代表するトレーサ粒子として、直径 20 μm 、比重が 1.02 のナイロン 12 粒子を用いた。計測時間は全ケースにおいて 60 秒間である。

本研究では高粒子濃度の流れを PTV 計測するために、2 ワットの高出力レーザー光を用いたが、さらに水路幅 B が 5cm の狭い水路を使用する必要があった。すなわち、本水理条件は PTV の撮影精度を上げるため、水路幅・水深比(アスペクト比)を $5/4=1.25$ と小さく設定した。このため外層では 2 次流の影響を無視できないが、本研究で対象とする内層($y/h \leq 0.2$)においては、ほぼ二次元乱流が成立し、また、粒子濃度が大きい壁面領域の乱流特性を解明できることを予備実験で確認した¹⁰⁾。

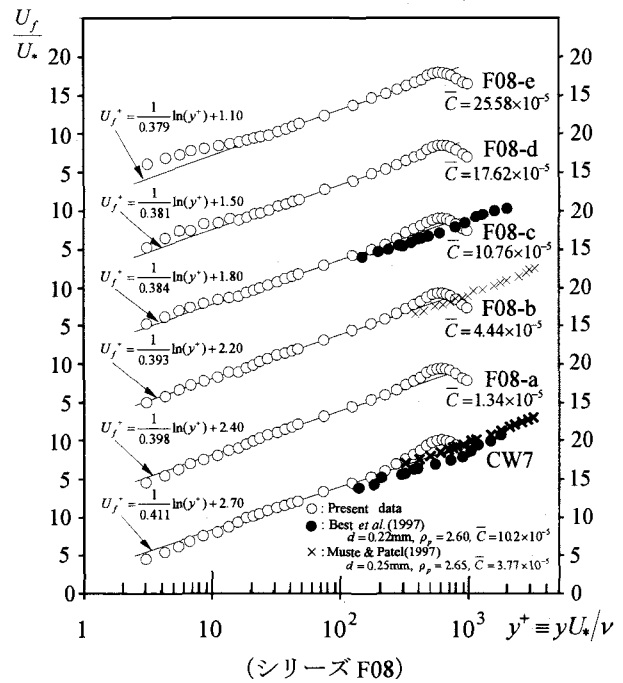
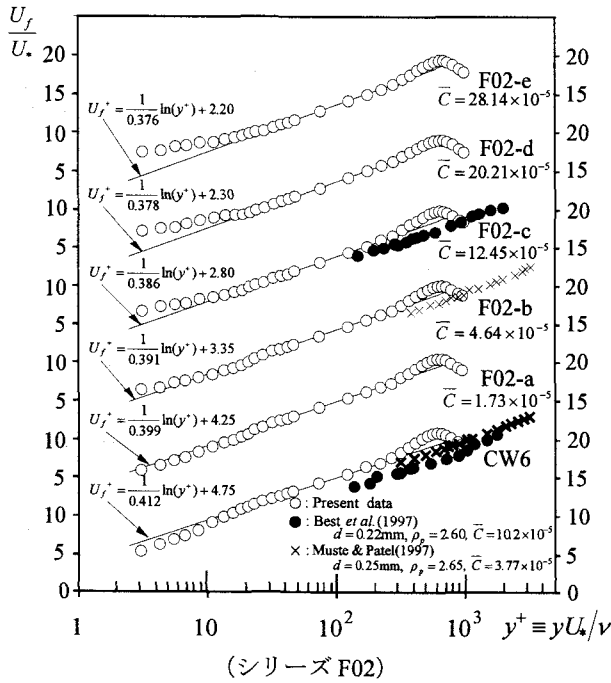


図-1 平均流速分布

(3) 計測システム

本研究では、撮影された粒子の投影面積にしきい値を設けることにより、対象粒子とトレーサー粒子（流体）の判別を行う投影面積判別法を開発し⁹⁾、同時計測を行った。トレーサー粒子の粒径が $20\mu\text{m}$ であるのに対し、対象粒子の粒径が $200\mu\text{m}$ あるため、投影面積は約 100 倍となる。よって実際に撮影された混相流画像において、対象粒子とトレーサー粒子間に明確な相違がみられ、両者の判別は容易であった。粒子の軌道追跡法としては 2 時刻スプリングモデル¹¹⁾を用いた。

3. 実験結果および考察

(1) 平均流速分布

摩擦速度 U_* は内層 ($y/h \leq 0.2$) における支配パラメータであり、平均流速分布を内部変数表示する際に必要である。したがって、その評価には細心の注意を要する。近年では内層のレイノルズ応力の実測値から U_* を算出する方法が研究動向となっており、このような摩擦速度 U_* のレイノルズ応力評価法は、現在多くの研究者によって採用されている^{2), 6), 8)}。この評価法については文献 9) を参照願いたい。この方法で算出された U_* の値を表-1 に示した。

図-1 に各シリーズにおける流体の平均速度 U_f の分布を示し、清流の結果 (CW6, CW7) も比較のため併示した。なお、各ケースにおいて縦軸を 10.0 ずつ上方にシフトして見やすく表示した。また、Best et al.²⁾ の清流およびガラス球 ($d_p = 0.22\text{mm}$, $\rho_p = 2.6$) を伴う流れ、Muste & Patel⁶⁾ の清流および自然砂 ($d_p = 0.21 \sim 0.25\text{mm}$, $\rho_p = 2.65$) を伴う流れの実験結果を比較

のために併示した。これらの実験データは本実験の粒子濃度と同程度のケースと併示させた。図中の右上がりの直線は滑面において成立する対数則の式(1)である。

$$U_f^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (30 \leq y^+ \leq 0.2R_*) \quad (1)$$

それぞれのケースについて、対数則領域 ($30 \leq y^+ \leq 0.2R_*$) における U_f の実測値と対数則の式(1)が良好に一致するように、最小自乗法を用い、カルマン定数 κ と積分定数 A を算出した。それらの値を代入した対数則をそれぞれのケースに併示した。

CW6 および CW7 の清流に関しては $\kappa = 0.411 \sim 0.412$ であり、Nezu & Rodi¹²⁾ の $\kappa = 0.412$ とほぼ完全に一致した。積分定数 A に関しては滑面開水路における約 5.3 よりも小さい値となっており、粗度の影響を受けていることがわかる。粗面において成立する対数則は滑面における対数則(1)を変形して以下になる。

$$U_f^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + A_r \quad (2)$$

$$A_r(k_s^+) = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{k_s U_*}{\nu} \right) + A \quad (3)$$

この式を CW6 に適用すると $A_r = 8.61$ 、CW7 では $A_r = 9.97$ となり、Nikradse の実験結果¹⁾ と概ね一致している。このことからシリーズ F02 はほぼ水理学的滑面であり、シリーズ F08 は遷移領域である不完全粗面であることがわかる。CW7 と比較して Best et al.²⁾ のデータは若干小さい値であるが、Muste & Patel⁶⁾ のデータは良好に一致しており、彼らの流れ場が不完全粗面であることがわかる。

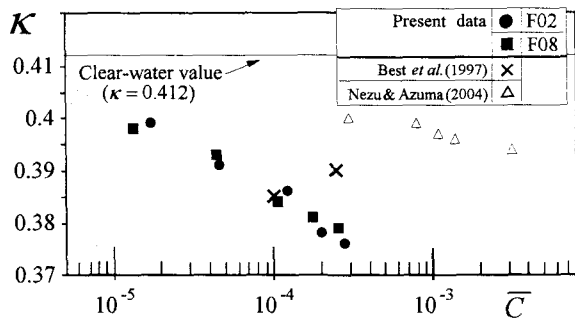


図-2 カルマン定数 vs.粒子濃度

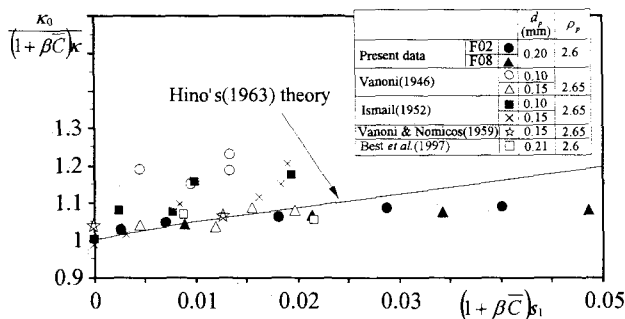


図-3 粒子濃度とカルマン定数の関係図

Best *et al.*²⁾, Muste & Patel⁶⁾は粗面混相流で A 値が減少し、滑面对数則より下方に平行シフトする原因は壁面粗度の影響によるものであり、浮遊粒子による影響はないとしているが、粒子濃度が大きくなると粒子・流体間の影響が無視できないと予測される。本研究においては、粒子濃度の変化によりカルマン定数 κ および積分定数 A が変化しており、これは粒子による影響を表している。粒子を伴う流れに関して、特に注目すべき結果は、 $y^+ \leq 20$ で流速 U_f が清流 U_{cw}^+ の値よりも大きく、流速が一樣高速化することである。両シリーズにおいて、粒子濃度の増加に伴いこの傾向が顕著となった。これは粒子・流体間の相互作用が活発になったためと考えられる。

(2) カルマン定数の変化特性

図-2にカルマン定数 κ と平均粒子濃度 $\bar{C}$ の関係を示す。Best *et al.*²⁾, Nezu & Azuma⁹⁾の実験結果も併示した。濃度 $\bar{C}$ の増加に伴い、カルマン定数 κ が系統的に減少している。同様な結果は Best *et al.*²⁾, Muste & Patel⁶⁾も指摘しているが、彼らは粒子濃度の変化による、 κ の減少特性については考察していない。Nezu & Azuma⁹⁾の実験結果は本研究よりも粒子濃度が大きいにもかかわらず、 κ の減少が小さい。この原因としては、本研究 ($\rho_p=2.6$) と比較して、彼らが用いたポリスチレン粒子 ($\rho_p=1.05$) は比重が小さく、粒子濃度が大きい場合でも、粒子の保持する慣性力の総量が小さいためと考えられる。すなわち、粒子・流体間の相互作用が小さいと推測される。

日野¹³⁾は粒子が浮遊した場合の乱れのエネルギー

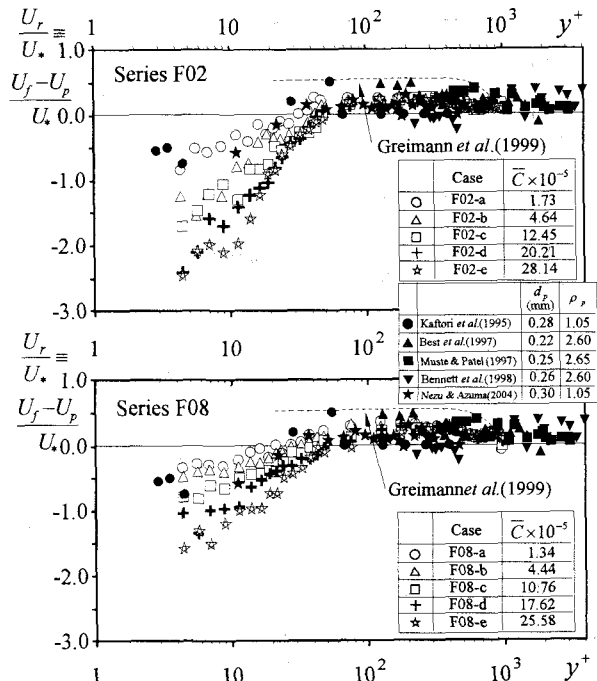


図-4 相対速度

平衡方程式から、 κ と $\bar{C}$ の以下のような関係式を提案した。

$$\frac{\kappa_0}{\kappa} = \frac{(1 + \beta \bar{C})}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4B\kappa_0(1 + \beta \bar{C})f_1} \right) \quad (4)$$

$$s_1 \equiv \frac{g(\gamma - 1)w_s \bar{C}(h - \delta)}{U_*^3 \ln(h/\delta)} \quad (5)$$

ここで、 κ_0 は清流におけるカルマン定数、 δ は粗度高さあるいは粘性底層厚、 w_s は沈降速度、 $\gamma \equiv \rho_p/\rho_f$ 、 $\beta=2.0$ 、 $B=13$ である。

図-3では本研究結果による式(4)の適用性を検討した。また、日野¹³⁾が比較した従来の Vanoni¹⁴⁾, Ismail¹⁵⁾, Vanoni & Nomicos¹⁶⁾の実験結果も併示した。その結果、Vanoni¹⁴⁾, Ismail¹⁵⁾, Vanoni & Nomicos¹⁶⁾の実験結果はかなりばらつきがあることがわかる。これは粒子データと流体データを判別分離しておらず1流体的に解析しているためと考えられる。本研究および Best *et al.*²⁾の実験値に関しては、粒子濃度が小さい場合(横軸の値が小さい領域)、式(4)と良好に一致している。しかし、粒子濃度が大きくなると、式(4)とは一致しない結果となった。広範な粒子濃度に関するカルマン定数の変化特性については更なる実験データの蓄積が必要であり、今後の研究課題である。

(3) 粒子・流体間の相対速度

粒子と流体の相対速度は非常に重要な問題である。なぜならば、相対速度が生じることにより粒子・流体間の運動量交換が発生するためである。これが粒

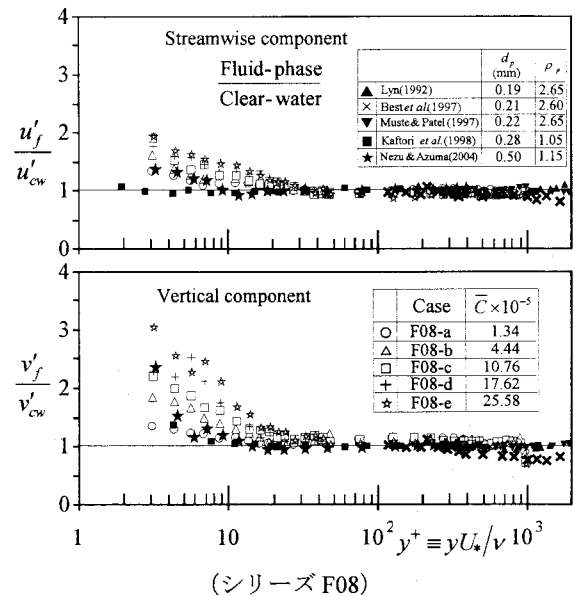
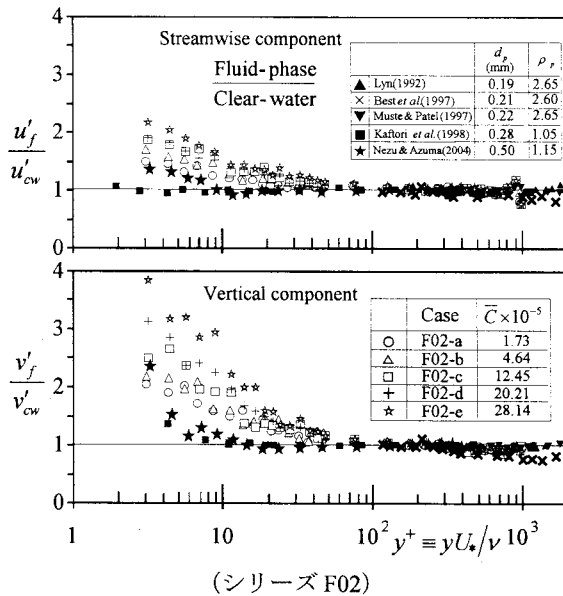


図-5 流体の乱れ強度の変調（乱流変調）

子・流体間の相互作用の本質と言っても過言ではない。そこで、図-4にシリーズ F02および F08の相対速度 $U_r^+ \equiv U_r/U_* = (U_f - U_p)/U_*$ の分布を示した。同図には Best *et al.*²⁾, Muste & Patel⁶⁾, Kaftori *et al.*⁸⁾, Nezu & Azuma⁹⁾, Bennett *et al.*¹⁷⁾の実験結果を併示し、相互比較した。また、以下に示す Greimann *et al.*¹⁸⁾が提案した外層における相対速度式(6)も併示した。

$$\frac{U_p - U_f}{U_*} = \frac{w_s}{U_*} \cdot 0.66 \cdot \left(1 - \frac{y}{h}\right) \cdot \exp\left(1.34 \cdot \frac{y}{h}\right) \quad (6)$$

壁面から離れた $y^+ > 30$ では粒子速度が流体速度よりも若干低速であり、 $(U_f - U_p)/U_* \approx 0.5 \sim 0.1$ でほぼ一定となっており、他の研究結果とほぼ一致している。Greimann *et al.*¹⁸⁾の式(6)は自由水面に向かって0に近づくため、自由水面近傍では本実験結果と一致するが、自由水面から離れると式(6)では相対速度を満足に表現できない。

一方、底面近傍の $y^+ \leq 30$ の領域においては、粒子速度が流体速度より高速($U_p > U_f$)となり、速度の逆転現象が生じている。これは Kaftori *et al.*⁸⁾, Nezu & Azuma⁹⁾も指摘している。さらに、両方のシリーズにおいて、粒子濃度の増加に伴い、相対速度が増加している。しかし、シリーズ F08の方がシリーズ F02と比較して、相対速度が全体的に小さいことがわかる。粒子濃度もほぼ同程度であることから、壁面粗度が大きくなることにより、壁面領域での流体の粘性効果が弱まり、流体速度および粒子速度との間の速度差が小さくなったと考えられる。したがって、壁面粗度の効果により粒子・流体間の相互作用が小さくなることが推測される。

(4) 乱れ強度の変調

流体の乱れ強度が粒子の存在により、清流と比較

して増幅あるいは減衰することは「乱流変調」と呼ばれ、粒子・流体間の相互作用を評価する上で重要な要素となる。

図-5に浮遊砂流中の流体と清流の乱れ強度比を示した。同図には Best *et al.*²⁾, Muste & Patel⁶⁾, Nezu & Azuma⁹⁾, Lyn¹⁹⁾および Kaftori *et al.*²⁰⁾の実験値も併示した。外層($y^+ \geq 0.2R_*$)では、流下方向および鉛直方向成分に関して、ほぼ1で一定となっており、乱れ強度の変調は見られない。これは外層における相対速度の値が小さいことからわかるように、流体の運動に浮遊砂が敏感に追従していることを示している。したがって、外層においては、浮遊砂と流体の運動の差異が非常に小さく、粒子・流体間の相互作用が無視できるほど小さいと考えられる。

底面近傍の $y^+ \leq 30$ の領域において、流体の乱れ強度 u'_f , v'_f が清流の値より増幅していることがわかる。この領域では相対速度が逆転し、粒子の運動の方が活発であることは上述したとおりである。これにより粒子から流体へと運動量の逆輸送が発生し、流速分布が清流と比較して高速化・一様化(図-1)し、その結果、流体の乱れが増幅されたと考えられる。粒子濃度の増加に伴いこれらの結果が顕著になることもわかる。これは粒子が保持する運動量あるいは慣性力の総量が、粒子濃度の増加に伴い、大きくなるためと考えられる。

また、両方のシリーズにおいて、鉛直方向成分 v'_f の方が流下方向成分 u'_f よりも大きく増幅されていることがわかる。Nezu & Azuma⁹⁾, Kaftori *et al.*²⁰⁾も同様の結論を得ている。彼らの値は本研究結果と比較して小さい値となっているが、これは、彼らが用いた粒子の比重が1.15および1.05と小さく、粒子の保持する慣性力が小さいためと考えられる。本研究結果は Nino & Garcia²¹⁾が指摘したように、粒子の上昇あるいは降下運動が流体の乱れ強度の鉛直方向成分 v'_f に

密接に関係している。すなわち、粒子運動と流体のバースト運動との相互作用の重要性を示すものと推測される。

シリーズ F02 と F08 を比較すると、流下方向および鉛直方向両成分について、シリーズ F08 の方が F02 より乱れ強度の変調が小さいことがわかる。これはシリーズ F08 においては壁面粗度の影響により、粗度近傍の流体の粘性効果が小さくなり、流体の運動が活発化したことが原因と考えられる。その結果、粒子と流体の挙動の差異が小さく、変調が小さくなったと考えられる。このことは壁面近傍における相対速度がシリーズ F08 の方が小さい(図-4)ことから明らかである。流砂輸送の本質である壁面領域において、壁面粗度は粒子・流体間の相互作用と密接に関係していることがわかった。しかし、本研究の結果だけで、粗面の影響を結論付けることはできない。さらなる高精度なデータの蓄積が必要である。

4. おわりに

本研究は、粗面開水路における浮遊砂流を投影面積判別 PTV 法により同時計測し、壁面粗度が粒子・流体間の相互作用に及ぼす影響を考察したものである。本研究では水理学的滑面および不完全粗面の 2 種の実験を行い、それらの平均流特性および乱流変調に及ぼす壁面粗度の影響について注目した。また、粒子濃度を系統的に変化させ、粒子濃度による変化も考察した。得られた結論は以下のようである。

1) 平均流速分布に関して、清流では壁面粗度の影響により滑面对数則から下方へ平行シフトし、従来の粗面流れに関する研究結果とほぼ一致した。しかし、浮遊砂を伴う流れでは粒子の影響により、粒子濃度の増加に伴いカルマン定数が系統的に減少した。

2) $y^+ \geq 30$ の領域では、粒子速度が流体速度よりも低速であり、逆に、壁面近傍領域 $y^+ \leq 30$ では、粒子速度の方が流体速度より高速となった。粒子濃度が増加すれば、この相対速度も増加することが認められた。また、不完全粗面の方が水理学的滑面よりも相対速度が小さくなった。これは壁面粗度の影響により、壁面近傍における流体の粘性効果が弱まり、流体運動が活発化し、その結果相対速度が小さくなったと考えられる。

3) 乱れ強度の変調に関して、 $y^+ \geq 30$ の領域においては、粒子の周囲流体の運動に対する追従性が高く、顕著な乱流変調は見られなかった。逆に、壁面近傍領域では、流下方向および鉛直方向成分ともに清流よりも乱れ強度が増幅された。また、粒子濃度の増加に伴いその増幅が大きくなった。特に、鉛直方向成分の増幅率は顕著である。不完全粗面の方が水理学的滑面よりも乱流変調が小さくなった。これは相対速度と同様に、壁面近傍では粗度の影響により流体の粘性効果が弱まり、その結果流体の運動が活発になったことが原因であると考えられる。

参考文献

- 1) Yalin, M.: *Mechanics of sediment transport*, Pergamon Press, 1972.
- 2) Best, J., Bennett, S., Bridge, J. and Leeder, M.: Turbulence modulation and particle velocities over flat sand beds at low transport rate, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.1118-1127, 1997.
- 3) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.106, pp.1325-1343, 1980.
- 4) Cellino, M. and Graf, W.H.: Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.125, pp.455-462, 1997.
- 5) Valiani, A.: The von-Karman coefficient in sediment-laden flow, *J. Hydraulic Res.*, IAHR, Vol.29, pp.129-136, 1991.
- 6) Muste, M. and Patel, V.C.: Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.742-751, 1997.
- 7) Kulick, J.D., Fessler, J.R. and Eaton, J.K.: Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.277, pp.109-134, 1994.
- 8) Kaftori, G., Hetsroni, G. and Banerjee, S.: Particle behavior in the turbulent boundary layer. II. Velocity and distribution profiles, *Phys. Fluids*, Vol.7, pp.1107-1127, 1995.
- 9) Nezu, I. and Azuma, R.: Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open-channel flows, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.130, pp.988-1001, 2004.
- 10) 瀬津家久, 東良慶: 開水路乱流場における粒子-流体運動に及ぼす側壁の影響, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.487-492, 2004.
- 11) Okamoto, K., Hassan, Y.A. and Schmidl, W.D.: New tracking algorithm for particle image velocimetry, *Experimental Fluids*, Vol.19, pp.342-347, 1995.
- 12) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 13) 日野幹雄: 固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化, 土木学会論文集, 第 92 号, pp.11-20, 1963.
- 14) Vanoni, V.A.: Transportation of suspended sediment by water: *Trans. of ASCE*, Vol.111, pp.67-102, 1946.
- 15) Ismail, H.M.: Turbulent transfer mechanism of suspended sediment in closed channels: *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.77, pp.1-26, 1952.
- 16) Vanoni, V.A. and Nomicos, G.N.: Resistance Properties of sediment-laden streams: *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.85, pp.77-107, 1959.
- 17) Bennett, S.J., Bridge, J.S. and Best, J.L.: Fluid and sediment dynamics of upper stage plane beds, *J. Geophysical Res.*, Vol.103, pp.1239-1274, 1998.
- 18) Greimann, B. P., Muste, M. and Holly, F. M.: Two-phase formulation of suspended sediment transport formulation, *J. Hydraulic Res.*, IAHR, Vol.37, pp.479-500, 1999.
- 19) Lyn, D.A.: Turbulence characteristics of sediment-laden flows in open channels, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.118, pp.971-988, 1992.
- 20) Kaftori, G., Hetsroni, G. and Banerjee, S.: The effect of particles on wall turbulence, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.24, pp.359-386, 1998.
- 21) Nino, Y. and Garcia, M.H.: Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport, *J. Fluid Mech.*, Vol.326, pp.285-319, 1996.

(2004. 9. 30 受付)