

河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が液相の乱流構造に及ぼす影響

EFFECTS OF SEDIMENT CONCENTRATION ON TURBULENT STRUCTURE IN SEDIMENT-LADEN
OPEN-CHANNEL FLOW OVER SAND DUNES

禰津家久*・野口和則**・山上路生***

Iehisa NEZU, Kazunori NOGUCHI and Michio SANJOU

*フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**学生員, 京都大学大学院修士課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

***正会員, 博(工) 京都大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

The present study describes an experimental investigation on effects of sediment concentration on turbulent structure in suspended sediment-laden open-channel flows over sand dunes by using both a discriminator particle tracking velocimetry (D-PTV) and a discriminator particle image velocimetry (D-PIV). D-PTV system was developed by Nezu & Azuma (JHE, ASCE, 2004). In this study, we also developed D-PIV system, which analyzes the image data with fluid tracers (without sediment particles). Fluid tracers and sediment particles were discriminated by their occupied particle size, and the velocities of particle and fluid were determined simultaneously.

As the results, turbulence intensities of fluid became smaller in sediment-laden flow than in clear water flow without sediment, as the sediment concentration became larger. The sediment concentration became larger by about 20% near the reattachment point behind dune when the kolk-boil vortex occurred.

Key Words : sand dunes, suspended sediment flows, particle-fluid interaction, turbulence modulation, velocity distribution, D-PTV, D-PIV

1. はじめに

実河川において、河床波形状は堆積土砂の巻き上げなど流れ場に様々な影響を及ぼしている。そのため、河床波流れは水工学および河川工学的に古くから注目され、流れの抵抗則や土砂輸送、さらには河床波背後で発生する組織渦の構造について解明されてきた^{1,2,3)}。特に Kadota & Nezu (1999)⁴⁾は、レーザー流速計を2台用いて河床波頂部から発生する組織渦の時空間相関構造を詳細に計測し、その組織構造の発生・発達メカニズムを3次元的に解明した。しかしながら、これらは浮遊砂が存在しない清流 (clear water) についての研究であり、浮遊砂が流れに及ぼす影響や乱流変調については述べていない。また、河床波上に浮遊砂を伴う流れに関する既往研究のほとんどが浮遊砂濃度のみに着目したものや、粒子と流体を混合体として扱ったいわゆる1流体モデルである⁵⁾。最近、Muste (2002)⁶⁾は浮遊砂流れをレビュー

し、粒子運動と流体運動の相互作用が極めて重要であるため、河床波流れについても粒子と流体の判別分離を行い、粒子・流体の2相混相流 (two-phase flow approach) として扱う必要性を強調している。そこで、粒子・流体の判別分離計測手法として、Nezu & Azuma (2004)⁷⁾は、粒子投影面積判別手法 (Discriminator particle tracking velocimetry : D-PTV) を開発し、平坦河床において浮遊砂流れの粒子速度と流体速度を同時計測することに成功した。さらに、禰津ら (2005)⁸⁾は上述で開発したD-PTVを、浮遊砂を伴う河床波流れに適用し、水流と浮遊粒子との相互作用を検討した。その結果、浮遊粒子を含むことにより、清流と比べて逆流域や再付着点付近で乱れが減少することを明らかにした。

しかしながら、彼らの実験は浮遊砂濃度が非常に小さいケースに限られており、また平均流速や乱れ強度などの時間平均統計量しか言及していないため、画像解析手法を含めたさらなる検討が必要である。

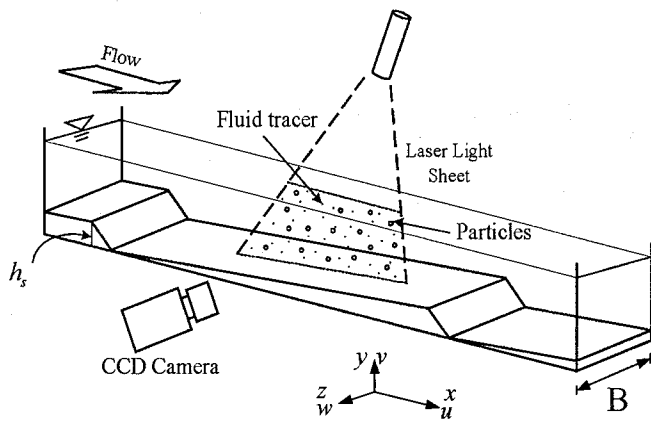


図-1 実験水路図と座標系

そこで、本研究では、浮遊砂量を段階的に増加させ、粒子濃度の変化が浮遊砂流の平均流特性および乱流変動に与える影響を詳しく解明する。さらに、新しい画像解析手法 (Discriminator particle image velocimetry : D-PIV) を開発し、それを用いることで粒子を伴うことによる乱流構造の変化について検討することを目的とした。

本研究では、水流 (fluid) 及び浮遊砂粒子 (particle) に関する平均流及び乱れ特性の河床波背後における変化特性を考察するために、①河床近傍層、②wake層、③外層の3層に着目して、この3層での流下方向の分布について比較・検討を行った。また、前報⁹⁾では最大流速を無次元化を行う際、速度スケールとして用いたが、本研究では摩擦速度 U_* を全河床領域で空間平均した $\overline{U}_*$ を用いた。これは、Lyn³⁾によれば、 U_* が外層の乱れスケールに対応するためである。

2. 実験概要

2.1 実験方法

図-1に実験水路図を示す。本実験で使用した水路は全長4m、幅5cmの亚克力製循環式直線水路である。x, y およびzはそれぞれ主流方向、鉛直方向、横断方向の座標軸である。U, VおよびWはそれぞれの軸に対応する時間平均流速で、u, v, wはその乱れ成分である。 h_s は河床波高さ、 L_s は河床波の波長である。流路全域にわたって、河床波勾配 h_s/L_s が1/20の2次元河床波モデルを連続して設置した。河床波モデルの波長 L_s と平均水深 h との比 L_s/h および河床波勾配 h_s/L_s は、実河川でよく見られる典型的な値($L_s/h = 5.0$, $h_s/L_s = 1/20$)⁹⁾に設定した。実験手法と画像撮影方法は前報と同様である⁹⁾。流れ場の撮影は水路側壁付近に設置されたCCDカメラによって行い、光ディスクに512×480ピクセルのフレーム

表-1 水理条件

case	U_m (cm/sec)	B (cm)	h_s (cm)	h (cm)	Fr	U_{*T} (cm/sec)	$\overline{C}$ ($\times 10^{-4}$)
sw0	33.12	5	1	4	0.53	2.24	-
sw1						2.294	3.52
sw2						2.324	6.05
sw3						2.358	9.35

画像を1/30sごとに記録した⁷⁾。

表-1に実験ケースを示す。 $U_m = Q/(Bh)$ は断面平均流速、 B は水路幅、 h は平均水深、 h_s は河床波高、 Fr はフルード数、 U_{*T} は全河床領域で空間平均した摩擦速度、 $\overline{C}$ は体積平均粒子濃度である。体積平均浮遊砂濃度は、2mm厚のLLSで可視化された全ガラス球の体積を分子、撮影範囲の面積とLLS厚さから算出された体積を分母として計算し、60秒間の平均を求めたものである。

本研究では一定流量 ($Q = 0.57\text{l/sec}$) の条件で、粒子を含まない清流 (sw0) で実験を行い、次に粒子を含むケースについてsw1から段階的に粒子濃度を増加させ、濃度が最大のケース (sw3) までの3ケース、合計4ケースの実験を行い、浮遊砂流と清流との比較、および浮遊砂流における粒子と流体の相互作用についての考察を行った。また、粒子投入後、粒子濃度および流れ場が安定平衡状態に達するまで約1時間浮遊砂を有する水流を循環させ、平衡状態に達した後に計測を行った。各ケースとも1ピクセルが実寸の0.0238cmに相当した。本研究では浮遊粒子として粒径0.2mmのガラス球 (比重2.6) を、流体のトレーサーとして粒径0.025mmのナイロン12粒子 (比重1.02) を使用した。これらの投影面積は50倍以上異なるため、粒子と流体の判別分離は容易であり、すべてのケースにおいて良好に適用できた。

Nelsonら¹⁾は空間平均されたレイノルズ応力分布から U_{*T} を算出できることを指摘しており、本研究も彼らと同様の手法から U_{*T} を評価した。すなわち、波長区間 $0 \leq x \leq L_x$ で空間平均されたレイノルズ応力分布は外層で直線分布することから、 U_{*T} が評価された¹⁾。この U_{*T} の値を表-1に併示する。

2.2 画像解析手法

本研究では、実験の画像解析を行う際、2種類の解析方法であるD-PIVとD-PTV⁷⁾を用いた。D-PIVは、撮影された画像において、前述のように砂粒子を投影面積のサイズによって除去する。処理後の画像に対してPIV解析

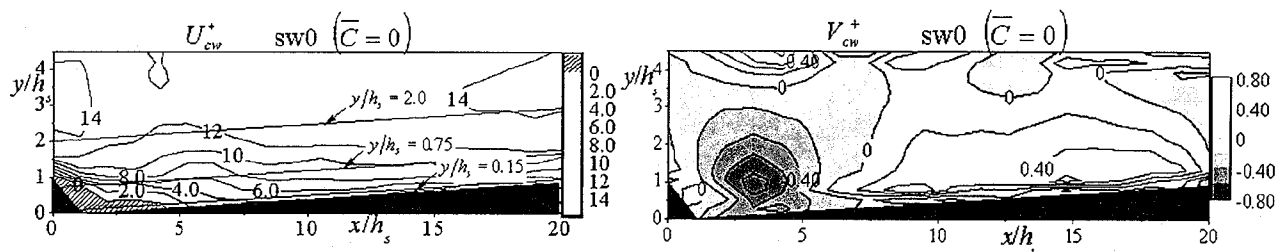


図-2 清流での主流方向流速 U_{cw}^+ および鉛直方向流速 V_{cw}^+ の空間分布

を行うと、全格子点における流速データが時系列に得られる。前報⁸⁾では、粒子・流体の両方の解析にD-PTVを用いたが、PTVでは、追跡する粒子やトレーサーが存在しなければ流速が得られないという難点がある。そこで、本研究ではこの問題点を克服するために、砂粒子はD-PTV、流体はD-PIVで解析した。以上のようにして、粒子・流体の流速が同時に得られた。清流 (clear water)、流体 (fluid)、砂粒子 (particles) の諸量にそれぞれ添字 $_{cw}$, $_{f}$, $_{p}$ を付加し区別する。例えば、 U_f は浮遊砂を有する流れの水流のみの平均流速を示す。

2.3 流れ場の2次元性の検証

2次元開水路乱流を形成するには、水路側壁の影響を小さくするため、本来であれば、水路幅と水深の比 B/h (アスペクト比) が5以上の大きい水路を使用する必要がある⁹⁾。ところが、浮遊粒子を伴う流れでは、粒子濃度が増加するにつれて、CCDカメラとレーザーライトシート (LLS) との間に大量の粒子が送流されるため、計測断面の撮影が手前の粒子に遮蔽されて困難になり、エラーベクトルが急増することが前報の実験でわかった⁸⁾。そのため、本研究では水路幅が小さいアクリル製水路 ($B=5\text{cm}$) を用いて計測を行った。この水路のアスペクト比は $B/h=1.25$ となり、平坦河床では2次流が発生していると考えられるが⁹⁾、河床波流れでは2次流の影響は、 $y/h_s < 3.0$ の領域では無視できるほど小さく、水面領域を除けばほぼ2次元河床波流れが形成されていることが前報⁸⁾よりわかっている。

3. 実験結果および考察

3.1 清流における平均流速分布

図-2は、清流 (clear water) における主流速 U_{cw} 、および鉛直方向流速 V_{cw} を波長平均摩擦速度 U_{τ} でそれぞれ無次元化し、 $U_{cw}^+ \equiv U_{cw} / U_{\tau}$ 、 $V_{cw}^+ \equiv V_{cw} / U_{\tau}$ のコンター図

を示したものである。 U_{cw}^+ については、河床近傍において $x/h_s \leq 4.5$ の領域で逆流となる。さらに、 $x/h_s < 6$ の領域ではクレスト背後の水深の急増による流速の減少がみられる。一方、 $x/h_s \geq 6.0$ においては局所水深の低減による加速がみられる。これらの結果は従来のレーザー流速計による結果とよく一致している^{1,2,3)}。 V_{cw}^+ については、 $x/h_s < 5$ の領域において強い下降流が発生しており、 $x/h_s \geq 5$ では上昇流が発生する。浮遊砂流においても流れの概況は図-2の清流とほぼ同様であるが、詳細に検討するためには両者の差異を検討する必要がある。

3.2 浮遊砂を伴うことによる流体の流速変化

(1) 流体の主流速 U_f の変化特性

粒子濃度 $\bar{C}$ による変化を詳しく検討するため、図-2に示すように①河床近傍層 ($y/h_s=0.15$)、②wake層 ($y/h_s=0.75$)、③外層 ($y/h_s=2.0$) の3つの代表検査断面で浮遊砂流sw1~3の流体速度 U_f と清流sw0の流体速度 U_{cw} の差 $\phi_u = U_f^+ - U_{cw}^+$ を図-3に示した。左から、河床近傍層 ($y/h_s=0.15$)、wake層 ($y/h_s=0.75$)、外層 ($y/h_s=2.0$) であり、流下方向 x/h_s に対して ϕ_u の変化特性をプロットした。まず河床近傍について、 $U_f < 0$ 、 $U_{cw} < 0$ である逆流域 ($x/h_s < 4.5$) では、図より $\phi_u = U_f^+ - U_{cw}^+ > 0$ となっている。すなわち、逆流域においては、逆流の流速が浮遊粒子濃度の増加とともに小さくなると考えられる。一方、河床近傍における順流域 ($x/h_s > 4.5$) では、濃度が増加するとともに流速が増加する。これは、wake層や外層に存在する比較的高速な粒子が低速である河床近傍領域に落下する際に、粒子が周囲流体と相互作用して流体速度が増加するためと考えられ、このメカニズムは平坦河床と同様である⁷⁾。wake層や外層においては、クレスト背後の減速域では $U_f > U_{cw}$ となるが、その後の加速領域では逆に $U_f < U_{cw}$ となっている。これらの現象は浮遊砂濃度の増加とともに顕著になっており、このことは、粒子濃度が増加すれば、減速や加速などの流れ場の急激な変化に対する流体速度 U_f の応答が鈍くなったものと推測される。

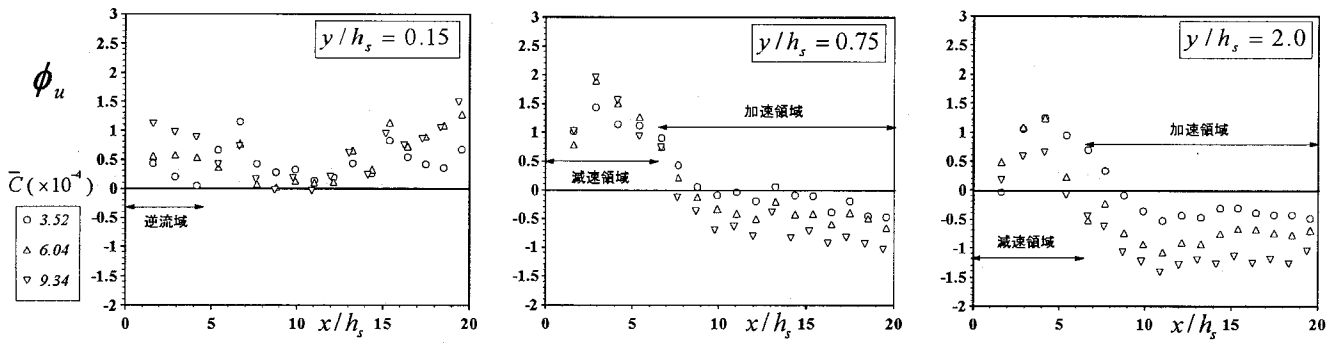


図-3 浮遊砂流と清流の主流速差 ϕ_u の流下方向変化

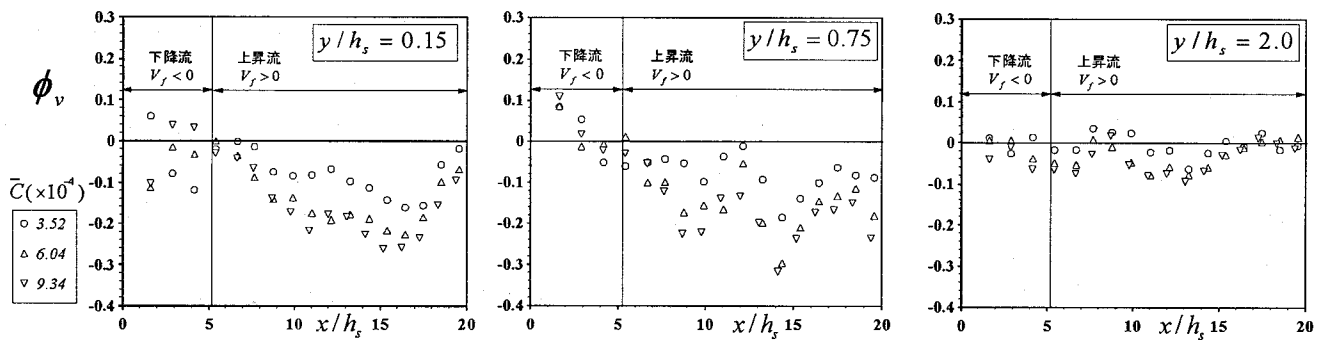


図-4 浮遊砂流と清流の鉛直方向流速差 ϕ_v の流下方向変化

(2) 流体の鉛直方向流速 V_f の変化特性

鉛直方向流速についても粒子濃度変化による差異を見るために、主流速方向と同様に、 $\phi_v \equiv V_f^+ - V_{cw}^+$ とし、 $y/h_s=0.15, 0.75$ および 2.0 の3検査断面の流下方向プロットを図-4に示した。流速が大きな外層ではほとんど差異が見られないが、河床近傍層、wake層などの平均流速は小さいが乱れの大きい領域では、上昇流($V_{cw} > 0$)が発生する領域($x/h_s > 5.0$)で ϕ_v の負の値が粒子濃度の増加とともに大きくなることが確認された。これは、比重の大きな粒子は下降しやすいため、粒子濃度が増えるとともに流体の上昇も抑えられるという現象が生じていると推測できる。このことにより、再付着点背後に発生するコルク・ボイル渦による上昇流も浮遊砂濃度が増大すれば抑えられると推測されるが、これについては後述する。

3.3 流体の乱れ強度の特性 (乱流変調)

(1) 流下方向の乱れ強度

図-5に清流の乱れ強度の流下方向成分 u'_f を U_τ で無次元

化してプロットした。また、図中にMcLeanら²⁾のレーザー流速計による実験値も併示した。ここで、 $u'_f \equiv \sqrt{u_f'^2}$ は乱れのrms値である。PIVによる本実験値はレーザー流速値とは良く一致しており、これによると、wake層において最も変化が大きくなる。すなわち、乱れが最大値をとるのはクレスト背後であり、その後徐々に減衰し河床近傍の値に漸近している。

乱れ強度のピーク値をもつwake層は、前節で述べたように粒子濃度の変化に伴う流速変化が顕著に見られた領域である。したがって、このような流速変化と乱れ強度の変化の関係を詳しく検討するために、乱れ強度についても、wake層($y/h_s=0.75$)での浮遊砂流の流体の乱れ強度 u'_f と清流の u'_{cw} の比をとり、図-6に示した。この結果から、粒子濃度の増加とともに乱れ強度は大きく減衰することがわかる。特にクレスト背後の組織渦が発生・発達する複雑な領域での乱れの減衰が最も大きいという結果となり注目される。これは、クレスト上流から流れ込む浮遊粒子の存在により、組織渦の発生・発達が抑制されるものと推測される。

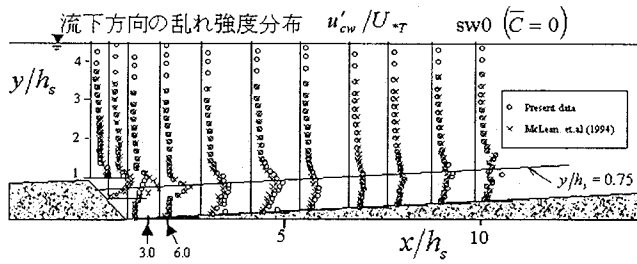


図-5 清流における流下方向の乱れ強度分布

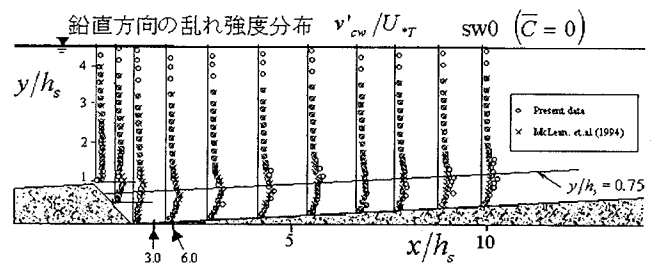


図-7 清流における鉛直方向の乱れ強度分布

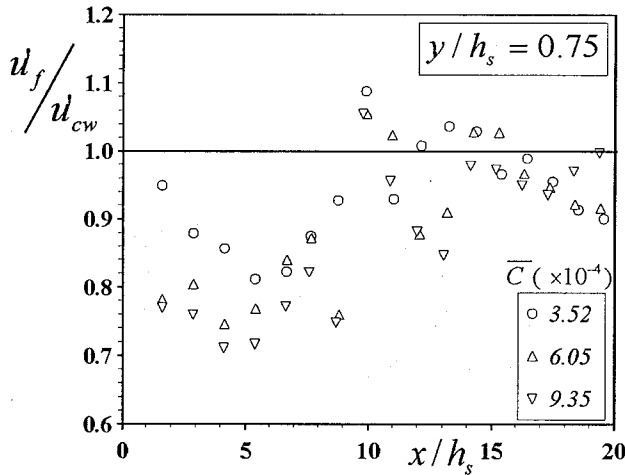


図-6 wake層での流下方向の乱流変動

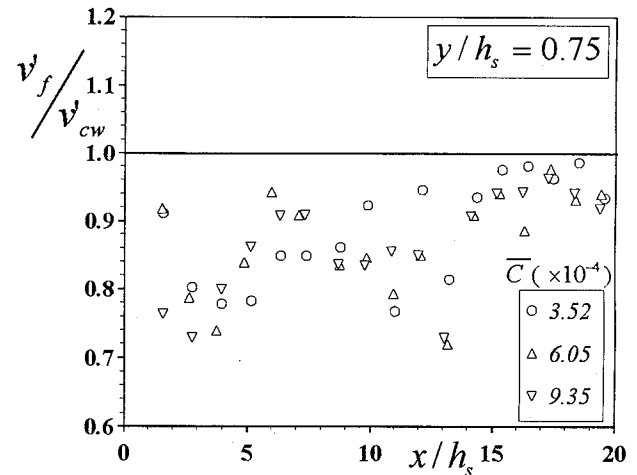


図-8 wake層での鉛直方向の乱流変動

(2) 鉛直方向の乱れ強度

同様に、図-7に清流の乱れ強度の鉛直方向成分 $v'_f \equiv \sqrt{v_f^2}$ を U_{τ} で無次元化してプロットし、図中に McLeanら²⁾の実験値も併示した。両者の値は良好に一致している。 v'_f は u'_f と同様の傾向をもつが、値や変化幅は共に u'_f と比べて小さい。しかしながら、河床近傍では下降する粒子の影響により、乱れ分布に変化が生じている。これについても粒子濃度の増加に伴う乱れ強度の変化を検討する。図-8はピーク値を持つwake層における浮遊砂流の乱れ強度 v'_f と清流の v'_{cw} の比をプロットしたものである。この図から、wake層の全域で乱れの減衰が見られ、特に逆流域から再付着点上部、さらにはその背後領域に至るまで、かなりの領域で大幅な減衰が見られた。その減衰の割合は最大で30%程度であり、流下方向成分 u'_f とほぼ一致していることは興味深い。このように、粒子濃度が増加するとともに乱れの減衰が大きくなるので粒子・流体の相互作用は無視できず、粒子・流体を2-way手法で検討する必要があることが再認識される。

3.4 レイノルズ応力分布

図-9に粒子を含まない清流のレイノルズ応力分布を示した。wake層付近においてレイノルズ応力はピーク値をとり、クレスト背後で最大値をとった後減衰する結果となり、McLeanら²⁾やLyn³⁾の結果と一致する。そのピーク値が、粒子濃度が増加するに従ってどのように変化するかを詳しく調べる。図-10はsw0～sw3の4ケースにおいて、wake層におけるレイノルズ応力の変化を粒子濃度 $\bar{C}$ をパラメータにとって示す。wake層では、浮遊砂濃度が増加するに従い、流体のレイノルズ応力の最大値が小さくなる。このことは、これまでの考察で述べたように、粒子の存在が乱れを抑制することに対応する。

3.5 乱れの相関係数

図-11は前節のレイノルズ応力分布において、粒子濃度によって変化が見られたwake層について、流体における流下方向の乱れと鉛直方向の乱れの相関係数、すなわ

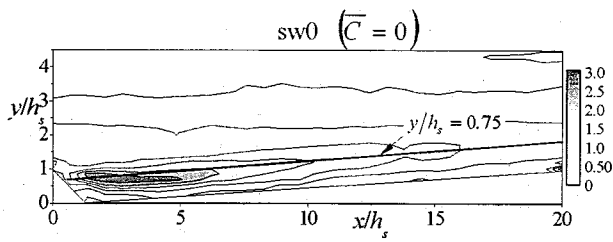


図-9 清流のレイノルズ応力分布

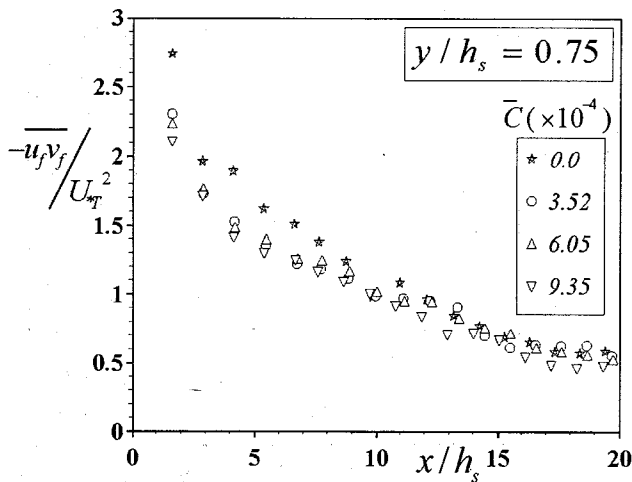


図-10 wake層におけるレイノルズ応力分布

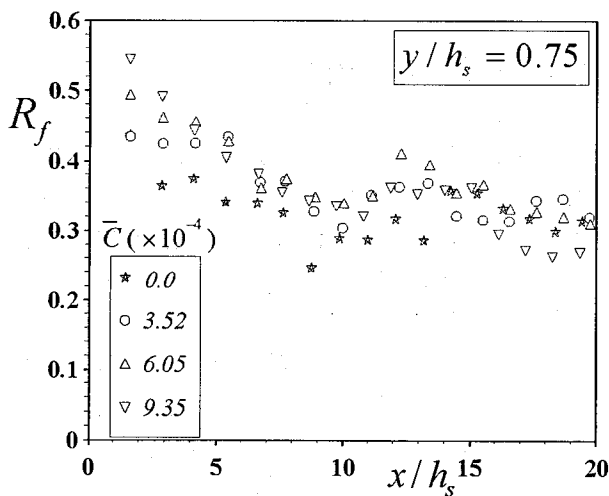


図-11 wake層における乱れの相関係数

ち、 $R_f \equiv -\overline{u'_f v'_f} / (\overline{u'^2_f} \overline{v'^2_f})$ を示したものである。この図によると、wake層ではクレスト背後で最も大きな相関係値を示しており、その後減少するという結果となった。また、その相関の最大値は浮遊砂濃度の増加とともに増加する傾向が見られた。

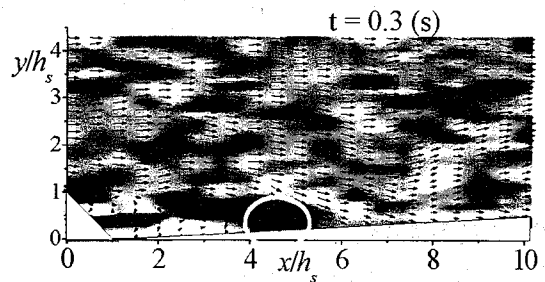
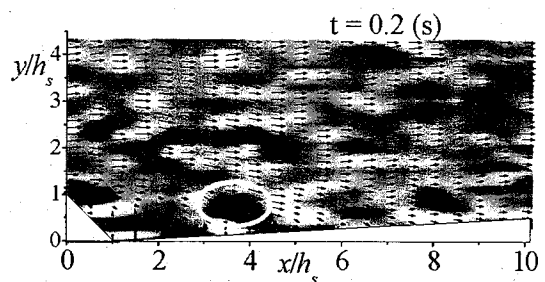
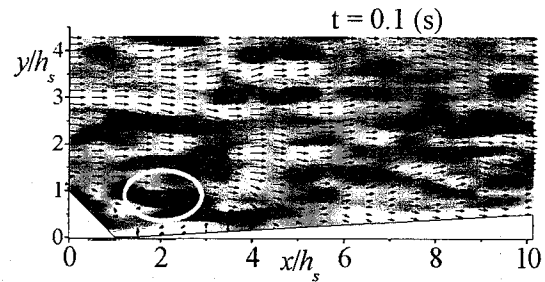
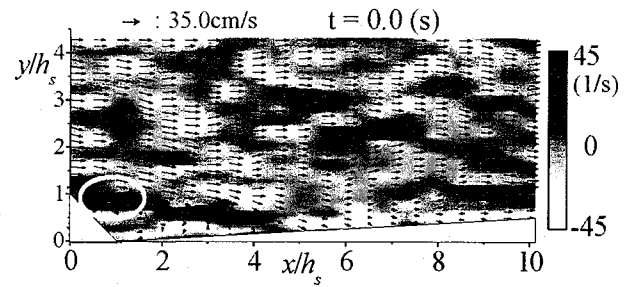


図-12 瞬間流速ベクトルと渦度分布と時間変化
(クレストからの剥離渦に着目)

3.6 瞬間流速と渦度分布

本研究では、浮遊砂流の流体速度の解析を行う際にD-PIVを用いた。これにより前報⁸⁾の解析方法(D-PTV)では算出できなかった瞬間流速値を求めることができた。ここでは、これまでの時間統計量の考察で注目した河床波流れ特有の現象、すなわちクレストから発生する剥離渦と再付着点背後に発生するコルク・ボイル渦の可視化を行い、瞬間流速ベクトルと渦度の移流特性に着目する。

図-12は浮遊砂流 ($\bar{C} = 6.05 \times 10^{-4}$) において、クレストから発生した剥離渦が再付着するまでの経過を可視化したものであり、それぞれの瞬間の流速ベクトル ($\vec{u}, \vec{v}$) と瞬間渦度 ω_z のコンターを図示した。 ω_z は次式のとおりである。

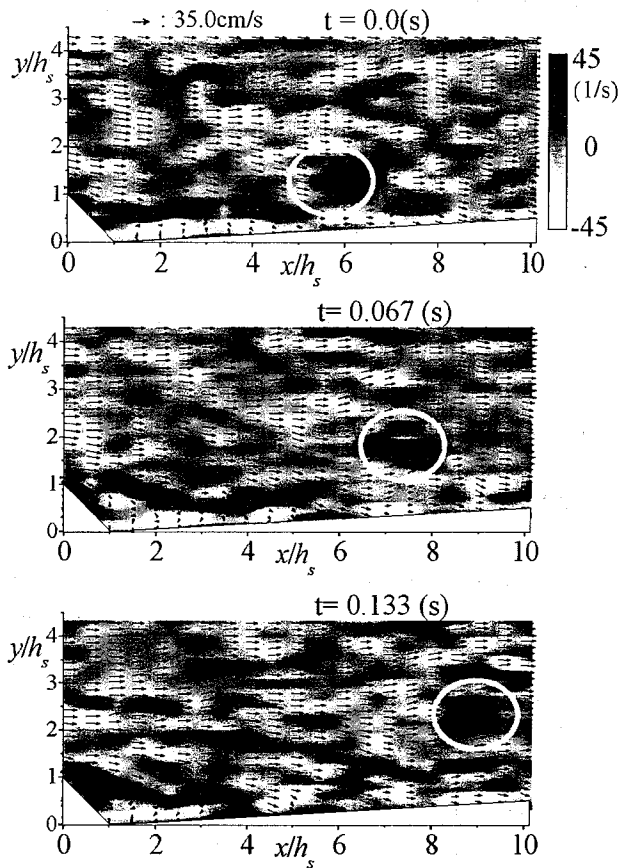


図-13 瞬間流速ベクトルと渦度分布の時間変化
(コルク・ボイル渦に着目)

$$\omega_z = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} \quad (1)$$

なお、各図の時間間隔は $\Delta t = 0.1s$ である。 $t=0.0$ において、クレスト頂部付近に渦が形成され、その渦が逆流域に沿うように移流し、 $t=0.3s$ において $x/h_s=5$ 付近で河床に再付着している。次に図-13は、同じ浮遊砂流 ($\bar{C} = 6.05 \times 10^{-4}$) において、再付着点の背後領域で発生したコルク・ボイル渦が移流される様子を可視化したものであり、これについても、図中に瞬間流速ベクトルと瞬間渦度分布を示した。なお、各図の時間間隔は $\Delta t = 0.067s$ である。 $t=0.0$ において、再付着点の背後領域、すなわち $x/h_s=6.0$ 、 $y/h_s=1.0$ 付近で発達した渦が存在しており、それが移流される様子が確認できる。さらに、それぞれの瞬間において、コルク・ボイル渦の移流過程での渦付近の流速ベクトルは上昇流を示していることも確認できた。このように、瞬間的に、強い渦度と上昇流が同時発生しているパターンが連続して可視化されたが、この上昇流に伴い、コルク・ボイル渦の発生領域において、瞬間的に局所的

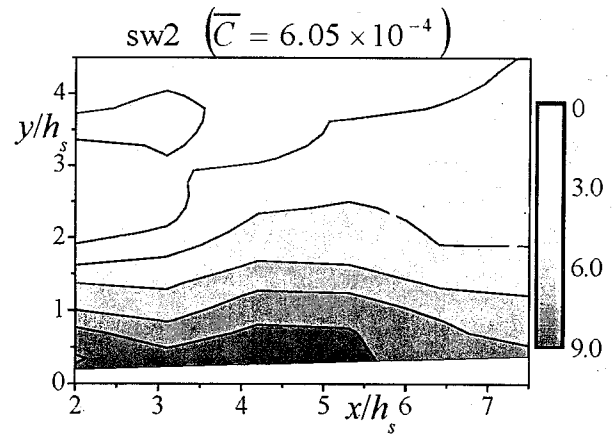


図-14 粒子濃度分布 C_{all}
(全時間平均)

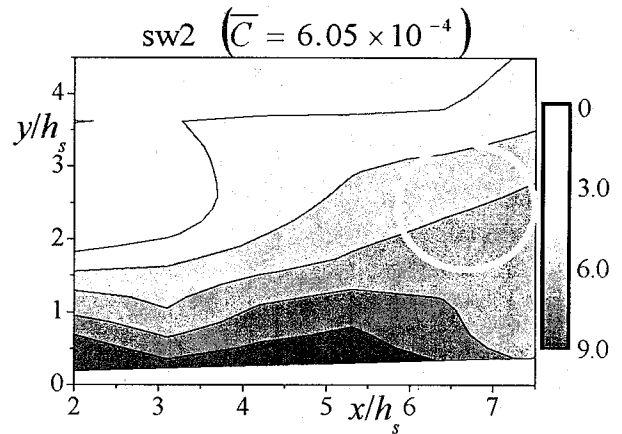


図-15 粒子濃度分布 C_{boil}
(コルク・ボイル渦発生時)

な浮遊砂濃度の増加が引き起こされると推測されるため、次節でその濃度変化について検討する。

3.7 コルク・ボイル渦による砂粒子の浮上

コルク・ボイル渦が浮遊砂の巻上げに強く影響していることはよく知られているが、どの程度の量の粒子が浮上させられるのかに関しては未だ解明されていない。前節において、コルク・ボイル渦により、瞬間的に局所的な浮遊砂濃度の増加が引き起こされる可能性が示唆された。そこで本節では、ボイル渦が発生している瞬間の平均粒子濃度 C_{boil} と、全計測時間で平均した浮遊砂濃度 C_{all} を比較する。なお、ここでは、簡便ではあるが、再付着点の背後領域、すなわち $x/h_s=6.0$ 、 $y/h_s=1.0$ 地点において上昇流が発生している瞬間をボイル渦が発生している事象と定義した。

図-14は浮遊砂流 ($\bar{C} = 6.05 \times 10^{-4}$) において全時間平均された粒子濃度 C_{all} の分布、図-15は同じく浮遊砂流 ($\bar{C} = 6.05 \times 10^{-4}$) において、ボイル渦が発生している事象での粒子濃度 C_{boil} の分布である。それぞれの図において丸で囲まれた領域は、前節でコルク・ボイル渦の移流が確認された箇所である。この領域においてボイル発生時に大幅な浮遊砂濃度の増加が見られ、平時と比べおよそ20~30%程度浮遊砂濃度が増加している。この結果から、コルク・ボイル渦は局所的に高濃度の浮遊砂を伴う乱流構造であり、その発生は、再付着点付近に発生した高い渦度に起因することが確認された。

4. おわりに

本研究では粒子判別PTVすなわちD-PTVを用いて、河床波上の流れにおける粒子速度を、またD-PIVを用いて流体速度を評価して、粒子・流体の相互作用と、粒子を伴うことによる周囲流体への影響について考察したものである。得られた主要な成果は以下のようなものである。

- 1) wake層や外層では、クレスト背後の減速の効果が粒子濃度の増加とともに鈍くなり $U_f > U_{cw}$ となるが、その後の加速領域では逆に $U_f < U_{cw}$ となった。すなわち、粒子濃度の増加により、減速や加速などの流れ場の急激な変化に対する応答が鈍くなる。また、逆流域の流速が粒子の増加とともに小さくなる。
- 2) 粒子濃度の増加に伴い、流体の降下速度が大きくなり、または上昇速度が小さくなる。この現象が特に顕著に見られるのは剥離域 ($x/h_s < 5.0$) であり、剥離域に形成されるような小さな運動量の渦では、渦中の上昇流に粒子は追従せず、下降する割合が大きい。
- 3) 剥離域や逆流域において流体に対する粒子の追従が鈍く、粒子はクレスト前方から大きな運動量を持ったまま複雑な流れ場に流れ込み、その結果乱れが減衰すると考えられる。また、比重、運動量共に大きな粒子は、その乱れも比較的小さく、複雑な流れ場において乱れを抑制する一因であると推測される。
- 4) レイノルズ応力は、wake層のクレスト背後において最大値をとるが、粒子濃度が増加するに従い、その最大値は小さくなる。また、乱れの相関のピークもwake層のクレスト背後において見られるが、これは逆に、粒子濃度の増加とともに増加する傾向が見られた。
- 5) クレスト頂部からの剥離渦、および再付着点背後で発生するコルク・ボイル渦は共に大きな渦度を保ちながら移流する。その際、剥離渦は逆流域に沿って移流し、コルク・ボイル渦は上昇流によって移流される。

- 6) コルク・ボイル渦によって河床近傍程度に高濃度の浮遊砂流が水面側に輸送され、局所的な粒子濃度の増加が起こる。その増加量はおよそ20~30%であった。

以上のように浮遊砂を伴う流れと清流との相違を統計的に検討し、さらに組織渦の発生と移流の過程、浮遊砂濃度の局所変化について考察した。しかしながら、本研究では1種類の粒径・比重の浮遊粒子しか扱っていない。実河川では、様々な粒径の粒子が混在していることから、さらに粒径効果を検討する必要がある、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Nelson, J. M., McLean, S. R. and Wolfe, S. R. (1993) : Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms, *Water Resources Research*, vol.29, No.12, pp.3935-3953.
- 2) McLean, S. R., Nelson, J. M. and Wolfe, S. R. (1994) : Turbulence structure over two dimensional bed forms: Implications for sediment transport, *Journal of Geophysical Research*, vol.99, pp.12729-12747.
- 3) Lyn, D. A. (1993) : Turbulence measurements in open-channel flows over artificial bed forms, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol.119, pp.306-326.
- 4) Kadota, A. and Nezu, I. (1999) : Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest, *Journal of Hydraulic Research*, vol.37, pp.59-80..
- 5) Yalin, M. S. (1977) : *Sediment Transport*, Pergamon Press.
- 6) Muste, M. (2002) : Sources of bias errors in flume experiments on suspended-sediment transport, *Journal of Hydraulic Research*, vol.40, pp.695-708.
- 7) Nezu, I. and Azuma, R. (2004) : Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol.130, pp.988-1001.
- 8) 禰津家久・野口和則・東良慶 (2005) : 河床波上の浮遊砂を伴う流れにおける粒子・流体の相互作用と乱流変調に関する研究, *応用力学論文集*, vol.8, pp.901-910.
- 9) Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993) : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

(2006. 4. 13受付)