A102

河床波上の浮遊砂流れにおける乱れと 流砂濃度の PIV・PTV 計測

櫛津家久(京都大学), 野口和則[○](京都大学), 山上路生(京都大学)

PIV・PTV Measurements of Coherent Vortex and Sediment Concentration in Sediment-laden Open-Channel Flows over Sand Dunes

Iehisa NEZU, Kazunori NOGUCHI and Michio SANJOU

ABSTRACT

In the present study, we developed the discriminator PIV and PTV systems (D-PIV& PTV), in which fluid tracers and sediment particles were discriminated reasonably by their occupied particle sizes, and thus, the velocities of particles and fluid could be measured simultaneously. As the results, we have investigated experimentally the sediment effects on coherent motion of kolk-boil vortices in suspended sediment-laden flows over sand dunes by using these D-PIV& PTV.

In particular, it was found that the kolk-boil vortex has a significant relation with the local distribution of suspended sediments near the reattachment point behind the dune crest.

Keywords: sand dunes, suspended sediment-laden flows, PIV&PTV

1. 緒言

実河川の流れ場は様々な要素から形成され、水理学的構造の解明を困難にしている。それらの要素中で、流れ場形成へ大きな作用を及ぼすものとして河床形状や流砂が挙げられ、特に河床波背後で発生するボイル渦は、河床に堆積した土砂の巻き上げ・浮上現象の原因として注目され、多くの研究がなされてきた。しかし、これらの研究の大半は浮遊砂を伴わない清流 (clear water) を扱っており、浮遊砂を伴う流れに関しても、浮遊砂濃度のみを計測した研究や、粒子と流体を判別せず、混合体としての計測が大半である。

そこで本研究は、浮遊砂を伴う河床波流れの撮影を行い、画像解析手法として、新しく Discriminator particle image velocimetry (D-PIV) を開発した。D-PIV は、粒子の投影面積によって粒子とトレーサーを判別した後、トレーサーは PIV を用いて、粒子は PTV を用いて解析を行う手法である。この手法により粒子と流体の同時計測を行うことができ、河床波流れの渦構造と浮遊粒子の巻き上げを関連付けて初めて考察を行うことができた。

2. 実験概要

2.1 実験方法

本実験で使用した水路は全長 4m、幅 5cm のアクリル製循環式直線水路である。その流路全域にわたって、河川でよく見られる典型的な河床波勾配 (1/20)¹⁾ の 2 次元河床波モデルを連続して設置した。図-1 に示すように、流れの瞬間構造は AOM と連動した CCD カメラ²⁾ を用いて水路中央断面を 1/30 秒ごとに計測した。表-1 に実験条件を示す。ここで、 B は水路幅、 h は平均水深、 U_m は断面平均流速、 h_s は河床波高、 Fr はフルード数、 $\bar{C}$ 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。

また、本実験水路はアスペクト比 B/h が 1.25 と小さく、水路中央断面付近まで 2 次流の影響があると考えられる

Table 1 水理条件

case	U_m (cm/sec)	B (cm)	h_s (cm)	h (cm)	Fr	U_{*T} (cm/sec)	$\bar{C}$ ($\times 10^{-4}$)
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

Fig. 1 実験水路図と座標系

が、予備実験により、水面付近に2次流の影響が観察されるものの、半水深より下部領域 ($y/h < 0.5$) においては、河床波頂部での剥離渦の発生からコルク・ボイル渦の放出に至る一連の組織構造の移流過程では2次流の影響は極めて小さいことを確認した²⁾。

2.2 解析方法

瀬津ら²⁾は、粒子・流体の両方の解析にD-PTV³⁾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、2種類の解析方法(D-PIV, D-PTV)を併用した。D-PIVでは、撮影された画像において、投影面積のサイズによって砂粒子を除去する。処理後の画像に対してPIV解析を行うと、全格子点における流速データが時系列に得られる。粒子数が少ない砂粒子はD-PTV、トレーサー粒子数が十分多量である流体はD-PIVで解析した。

3. 実験結果

ここでは、河床波流れ特有の現象、すなわち再付着点付近で発生するコルク・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-2は浮遊砂流 ($\bar{C} = 6.05 \times 10^{-4}$) において、再付着点 ($x/h_s = 4.5$) 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、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 のコンターを图示した。 ω_z は次式で定義される。

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

なお、各図の時間間隔は $\Delta t = 0.067$ s である。 $t=0.0$ において、再付着点の背後領域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、その濃度変化について次に検討する。

図-3は、全計測時間で平均した浮遊砂濃度 C_{all} (図-3左)と、ボイル渦が発生している瞬間の平均粒子濃度 C_{boil} (図-3右)を比較したものである。なお、ここでは簡便であるが、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。

それぞれの図において丸で囲まれた領域は、前図でコルク・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

図-2 瞬間流速ベクトルと渦度分布の時間変化

図-3 粒子濃度分布変化

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を有した組織渦に起因することが確認された。

参考文献

- 1) Yalin, M. S. (1977) : Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press.
- 2) 瀬津家久・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動に関する研究, 応用力学論文集, vol.8, pp.901-910.
- 3) Nezu, I. and Azuma, R. (2004) : Turbulence Characteristics and Interaction between Particles and Fluid in Particle-Laden Open Channel Flows, Journal of Hydraulic Eng., ASCE, vol. 130, pp. 988-1001.