第 II 部門 河床波背後のコルク・ボイル渦の乱流構造とそれに追随する粒子挙動について

京都大学 学生員 〇野口和則 京都大学 フェロー 禰津家久 京都大学 学生員 秋本哲朗 京都大学 学生員 中島与博

1. はじめに

河床波流れでは、クレストからの剥離渦や再付着点からのボイル渦などの様々な組織渦が発生し、それらが河床に存在する粒子の巻き上げ、移流に大きく寄与していると指摘されている $^{1)}$. そこで本研究では、PIV/PTV計測 $^{2)}$ によりボイル渦内部に存在する粒子の挙動に着目し、ボイル渦によって粒子がどのように浮上・輸送されるかについて検討した.

2. 実験手法および水理条件

本実験で用いた水路は、長さ 10m, 幅 40cm の可変勾 配型直線水路である. 実験水路と計測装置概要を図-1 に示す. 画像計測は図-1 に示すように水面側に設置さ れた High Speed CMOS カメラによって行われ,河床近 傍から水面付近までの 5 水平断面(v=1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5cm)をレーザーライトシート(LLS)で照射し、1/100s ごとに 1280×1024 pixel の画像を時間間隔 $\Delta t = 1/500$ s で 2 枚ずつ記録した. また, PTV 計測では粒子速度だけ でなく,画像中の粒子数をカウントすることにより 瞬間粒子濃度も算出した. 計測区間は浮遊砂流れが十 分に発達したと考えられる水路上流端から 7.0m 下流の 河床波 1 波とした. 水理条件を表-1 に示す. 全ケース で流量は一定とし、粒子を伴わない清流 CW が 1 ケー ス, 浮遊砂流れ SS が 2 ケースである. 表中の h_s は河 床波クレスト高さ、Um は断面平均流速、C は体積平 均粒子濃度である. 浮遊粒子はポリエキストラ粒子 $(\rho_p=1.2, d_p=0.2\text{mm})$ とガラス球 $(\rho_p=2.6, d_p=0.25\text{mm})$ を 使用した. また、流体のトレーサーとして、直径 d=0.025mm, 比重 ρ =1.02のナイロン 12粒子を用いた.

3. 実験結果および考察

清流のケースについて乱れ強度分布を図-2 に示した. 図中下部には各断面高さでの計測範囲と河床形状の関係を示している. これらの計測位置はボイル渦の発生・通過位置に合わせたものである. 縦軸は乱れ強度 u_f を外層で評価した摩擦速度 U_{*T} で無次元化した値を示している. 再付着点 (y=1.0cm, x=8.0cm)付近で最も大きな値をとっている. さらに、y=3.0cm, x=18.0cm 付近にピーク値を持つ結果となった. この領域はボイル渦通過領域であることから、ボイル渦の存在によって乱れ強度が増大したものと考えられる. ボイル渦領域は周囲流体より比較的低速の流体塊であるため、ボイル渦通過領域で

表-1 水理条件

case	Q (1/s)	B (cm)	h_s (cm)	h (cm)	U_m (cm/s)	$C(10^{-5})$
CW1						-
SS1.2	7.0	40.0	2.0	7.0	25.0	3.84
SS2.6						3.88

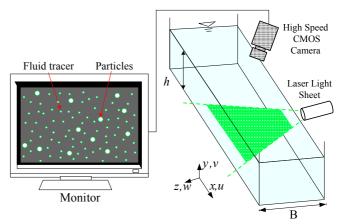


図-1 実験装置図

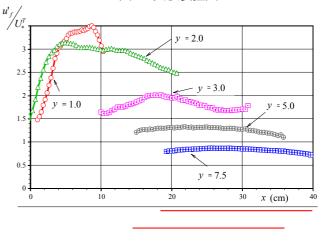


図-2 清流の乱れ強度と計測位置

は乱れの変動幅が大きくなる傾向にある³⁾. その結果, 本研究でも乱れ強度が増大したものと考えられる.

一方,河床波流れに浮遊粒子を投入して計測したケース(SS1.2, SS2.6)では、乱れ強度が清流よりも減衰する結果となった. 図-3 に SS1.2 における浮遊砂流れと清流の各断面高さにおける乱れ強度の比、すなわち乱流変調 u'_f/u'_{cw} を示した. 特にボイル渦通過領域において乱れの減衰が顕著であり注目される. これは、粒子の輸送に運動エネルギーを消費するため減衰したと考えられる.

また, この傾向は Nezu et al. (2008)⁴⁾の小粒径粒子 の実験と一致する.

次に粒子と流体の相対速度について考察を行う.

図-4 にボイル領域とそれ以外に区分した条件付相 対速度 (U_n-U_t) の分布を示した. 両者とも粒子速度が 流体速度よりも低速であること($U_p < U_t$)は一致する が、ボイル内部においてはより顕著に速度差が示さ れた、特に水面付近のボイル渦内部では粒子の追随 性が鈍く、ボイル渦から粒子が落下することが示唆 される.一方,ボイル渦発生直後の領域では相対速 度は小さく,強い上昇流に粒子が追随していると推 測される.

このような流れに浮遊する粒子の追随性について、 図-5 では粒子・流体の同時計測の観点から,瞬間 流速ベクトルと粒子の分布による考察を行う. 図-5 の左図に黒点で粒子の分布を示し、右図に流体の流 速ベクトルとそのコンターを示した. 流速ベクトル 分布での渦可視化手法⁵⁾として、ボイル渦の移流速 度 U_c =0.925 $U_{m(y=5.0)}$ を引いている. 両者とも同時刻 のデータであり、それぞれの時間間隔は 0.1 秒であ った. また, 図中の赤サークルがボイル渦領域を示 す. ボイル渦中心部分では粒子が上昇流に追随して いるため、0.1 秒後には前の画面に存在した粒子が LLS 位置から外れている. 一方で図中の青サーク ルのようなボイル渦外縁に存在するような粒子は、 強い上昇流から外れていることもあり比較的長時間 LLS 断面に停滞する傾向にあった. その際, ボイ ル渦外縁では流速の横断方向成分が強く現れており, それに追随して徐々にボイル領域外へ運搬されてい く様子がわかった.

4. おわりに

本研究は、PIV および PTV を用いて河床波流れ のボイル渦の乱れ構造について考察を行い、粒子を 伴うことで乱れが減衰することがわかった. さらに ボイル渦によって浮上する粒子のうち、渦の外縁に 存在する粒子は次第に外側へと拡散されることが定 性的に示された. しかしながら, 本研究では粒子濃 度が非常に小さく, 粒子の拡散を定量的に評価する には至らなかったため、今後の課題としたい.

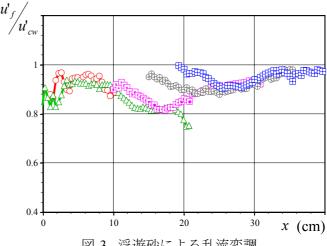


図-3 浮遊砂による乱流変調

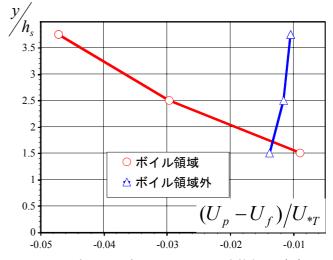


図-4 ボイル渦内外での粒子・流体相対速度

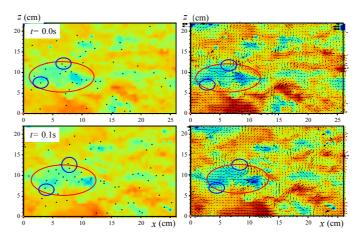


図-5 ボイル渦の瞬間構造と粒子の追跡

参考文献

- 1) Matthes, G.H. (1947): Macroturbulence in natural stream flow, Trans. AGU, vol.28, pp255-265.
- 2) Noguchi, K., Nezu, I. and Sanjou, M. (2008): Turbulence structure and fluid-particle interaction in sediment-laden flows over developing sand dunes, Environ Fluid Mech, Vol.8, pp.569-578.
- 3) 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, No.C6, pp.12729-12747.
- Nezu, I., Noguchi, K., and Sanjou, M.(2008): Effects of Particle Size and Concentration on Turbulent Structure in Sediment-Laden Open-Channel Flow, River Flow 2008, Proc., 4th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics pp.91-98
- 5) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins C.D. (2000): Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech. vol.422, pp. 1-54.