

第 II 部門

河床波背後のコルク・ボイル渦の瞬間構造について

京都大学
京都大学
京都大学
京都大学

学生員 ○中島与博
フェロー 棚津家久
学生員 野口和則
学生員 秋本哲朗

1. はじめに

河床波を有する流れにおいて、河床クレストからの剥離渦により逆流が生成され、その変動特性に伴ってコルク・ボイル渦が発生することが知られている。本研究ではコルク・ボイル渦水平面内の断層の渦構造を PIV・PTV 計測を用いて行い、空間相関と瞬間ベクトル図から組織渦の空間構造を検討した。

2. 実験手法および水理条件

本研究では長さ 10m、幅 40cm の直線水路を使用した。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 下流地点の河床波 1 波とした。実験は浮遊砂を有しない清流 Clear Water とし、表-1 示す 2 ケースを行った。CW1 は比較的低速な流れで染料の可視化を行った。CW2 は高速清流である。ここで h_s は河床波高、 U_m は断面平均流速である。流体挙動に追従するトレーサーとして、直径 0.025mm、比重 1.02 のナイロン 12 粒子を用いた。画像計測は水路中央付近 20cm 幅を、水面上部に設置された High Speed CMOS カメラによって撮影し、1/40s ごとに 1280×1024pixel の画像を時間間隔 $\Delta t = 1/150s$ で 2 枚ずつ記録した。その際、水路側壁から照射したレーザーライトシート(LLS)で断層画像が得られ、PIV 計測が行われた。実験装置図は文献 1) を参考願いたい。

3. 実験結果および考察

図-1 に実験ケース CW1 におけるボイル渦の一例を示す。左図は再付着点からの染料を水平面内で可視化したものであり、右図は同実験条件において PIV による流速分布の低速領域からボイル渦を可視化したものである。両者のサイズは非常に良く一致し、ボイル渦領域を流速分布から可視化できることがわかった。そこで CW2 のケースにおいて、流速分布からボイル渦を可視化する手法で水面付近 $y=5.0cm$ に存在する水平断面の渦の瞬間構造について考察を行う。

図-2 に実験ケース CW2 の $y=5.0cm$ 高におけるボイル渦の瞬間構造を時系列的に示す。各画像の時間経過は 0.1 秒である。図の横軸・縦軸はそれぞれ流下方向 x ・横断方向 z を示している。また、流れに存在する渦コアを判別する手法として、Adrian ら(2000)²⁾が提唱した瞬間流速分布から組織渦の移流速度 U_c を引く方法を用いている。本研究では、 U_c は $y=5.0cm$ の断面平均流速

表-1 実験条件表

case	Q (l/s)	B (cm)	h_s (cm)	h (cm)	U_m (cm/s)
CW1	4.2	40.0	2.0	7.0	15.0
CW2	7.0				25.0

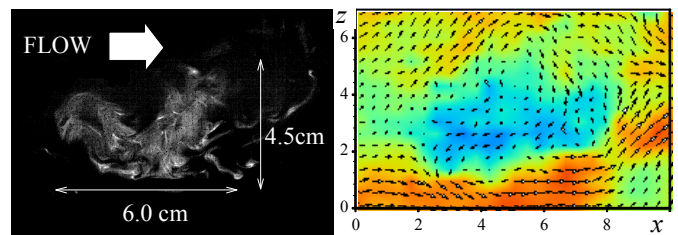


図-1 ボイル渦の可視化

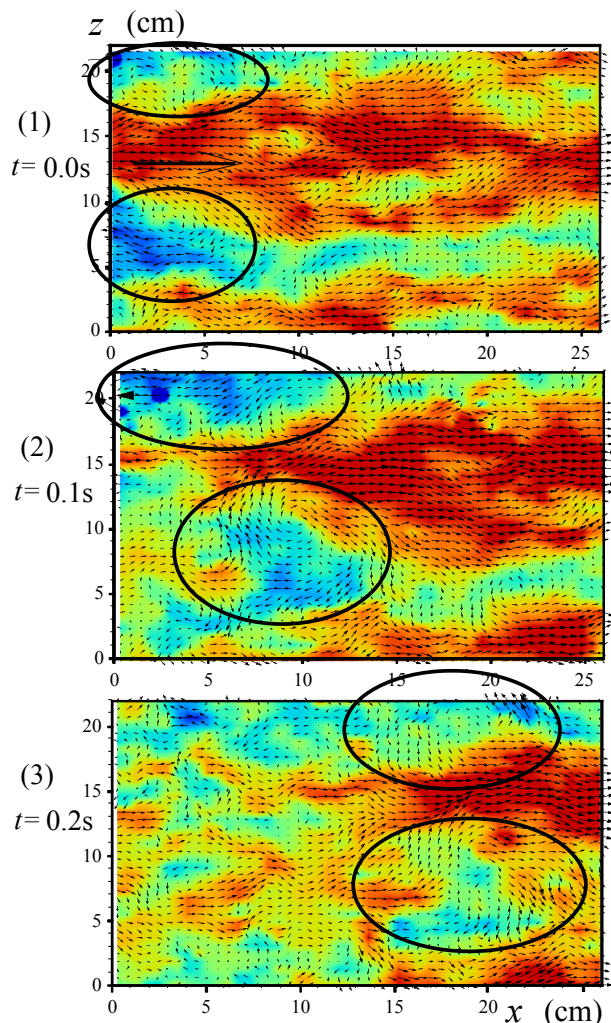


図-2 ボイル渦の瞬間構造

$U_{m(5.0)}$ の0.925倍であった。

図-2 ではボイル渦が2つ同時に発生しており、水路中央に速い流れが通り、それを挟んで遅い流れが通るとい現象が起きている。この現象は Müller & Gyr (1986)³⁾が提案したボイル渦のモデル(図-3)と似ている。詳細な瞬間構造としては、低速流体の上流側およびボイル渦の境界領域において、近接している高速流体に追従するように流れの向きが変化し、横断方向の流速成分が大きくなる結果となった。さらに隣り合う組織構造の距離がおおよそ $z=2h$ 、すなわち水深規模であることから、河床波から発生するボイル渦の規模が水深に依存していると示唆される。そこで、空間相関解析によって流下方向流速の相関特性を考察した。

流下方向流速成分 $\tilde{u}(t)$ に関する時空間相関係数 C_{uu} は次のように定義される。

$$C_{uu} = \frac{u(x_0, z_0, t_0)u(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0 + \tau)}{u'(x_0, z_0, t_0)u'(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0 + \tau)} \quad (1)$$

ここで、添字 o は時刻 t における基準点 (x_o, z_o) を表し、 $o+\Delta$ は基準点から $(\Delta x, \Delta z)$ だけずれた位置を意味する。図-4 では水面に近づくにつれて正の高相関領域が大きくなっており、これはボイル渦のサイズが水面ほど大きくなっていることを示している。さらに、高相関領域の横には比較的高い負の相関領域が確認でき、高速・低速の縞構造が形成されている。

図-5 には空間相関の横断方向分布を示した。横断距離 Δz が増加すれば C_{uu} は減少するが、負値に達した後再び増加して2次ピークをもつことがわかり注目される。この2次ピークは隣接するボイルをとらえたものと考えられ、この距離 Δz は y の増加に伴い増大することがわかった。さらに水面に近づくにつれピーク位置は $\Delta z=2h$ に近づく結果となり、実河川のボイル渦計測と一致した。

4. おわりに

以上より、河床近傍で発生する低速のボイル渦は、水深規模のサイズであり、渦の境界領域において横断方向の流速成分が大きくなることが示された。さらに空間相関の2次ピーク位置からボイル渦のサイズが水深位置に伴って増大し、半水深以上では隣り合う組織構造の距離が水深の2倍程度であることがわかった。

参考文献

- 1) 野口和則・榊津家久・秋本哲朗・中島与博 (2009) : 河床波背後のコルク・ボイル渦の乱流構造とそれに追従する粒子挙動について, 土木学会関西支部 (投稿中)
- 2) 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.
- 3) Müller, A. and Gyr, A. (1986) : On the vortex formation in the mixing layer behind dunes, J. Hydraul. Res., vol.24, pp.359-375.

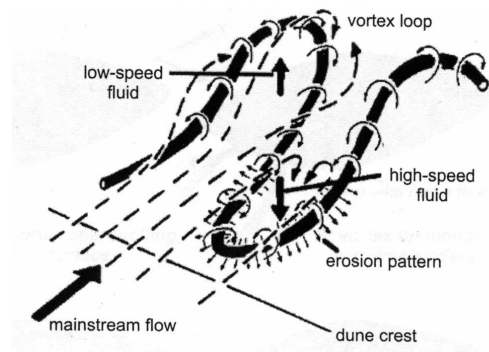


図-3 ボイル渦構造模式図

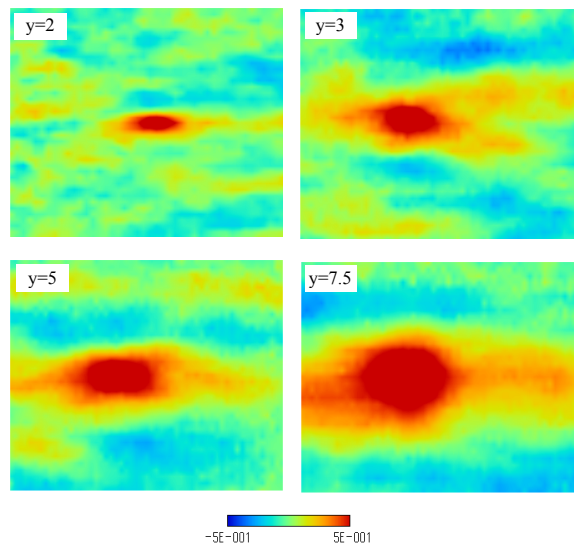


図-4 各高さにおける空間相関コンター

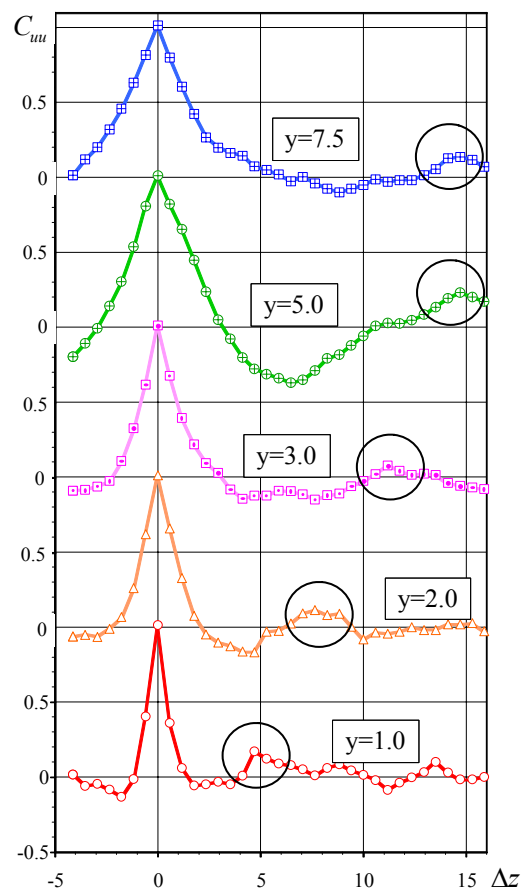


図-5 空間相関横断方向分布と2次ピーク位置