

河床波を伴う開水路乱流の大規模渦構造

熊本大学大学院 学生員 ○城戸 崇臣
 熊本大学大学院 正会員 大本 照憲
 熊本大学工学部 正会員 矢北 孝一
 熊本大学工学部 学生員 嶋添 恭平

1.はじめに

実河川に普遍的に現れる大規模組織渦の一つである第一種のボイルは、強い運動エネルギーを持っており、河道の変動、流れの抵抗則、土砂輸送と密接な関係を持っている。そこで、本研究では砂漣背後における形成される大規模渦構造の流速変動を測定し、加速、減速流による乱流場への影響について検討した。

2.装置および方法

計測システムの概略を図-1に示す。実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cm、高さ30cmの可変勾配型の循環式直線水路である。砂漣河床を模擬するため、図-2に示す形状で石膏製の河床波を作成し、横断方向に一樣な河床波を水路上端から流下方向に6.4m設置した。座標系は、水路上流端より5m下流位置の水路中央の河床を原点とし、流下方向にx軸、鉛直方向にz軸を設定した。実験条件を表-1に示す。砂漣の発生領域から算定し、次のように実験条件を定めた。流速測定には、粒子画像流速測定法(PIV法)を用い、一計測面に500枚の画像データに関して統計処理を施した。

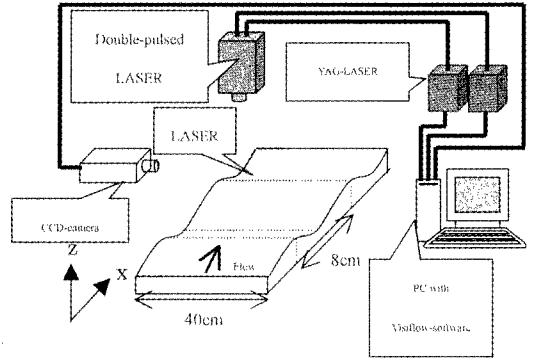


図-1 計測システムの概略

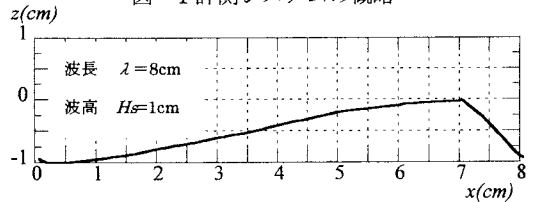


図-2 河床形状

3.基本特性

図-3は、実測された主流速の等値線を示す。最付着点は壁面近傍で時間平均流速がゼロとなる位置から同定すると、図より、最付着点距離は、 $x/Hs=3.5$ である事が分かる。剥離線下層では、循環流が形成されていることが示唆される。図-4は、主流速の鉛直分布を示す。 $z < 1cm$ の剥離領域では、流下方向に急激に加速されているのに対し、 $z > 1cm$ では僅かに加速されていることが確認される。図-5は、鉛直流速成分の流下方向変化を示している。流速、流下方向距離はそれぞれ、最大流速 U_0 、波高 Hs で無次元化されている。また実線は、参考線として、剥離線を示す。剥離領域の $x/Hs < 2$ では、上昇流を示し、 $2 < x/Hs < 3.5$ では下降流が存在し、循環剥離流が存在している事が認められる。

表-1 実験条件

流量	Q=1.98(l/sec)
水深	H=5.0(cm)
断面平均流速	Um=9.91(cm/sec)
最大流速	U0=12.9(cm/sec)
水路勾配	I0=1/1000
レイノルズ数	Re=4955
フルード数	Fr=0.14

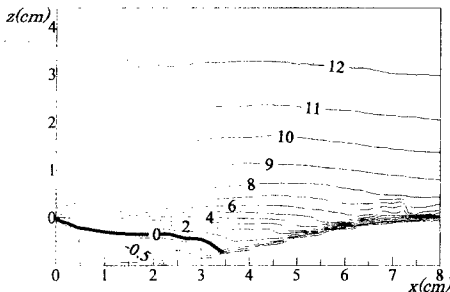


図-3 主流速の空間分布

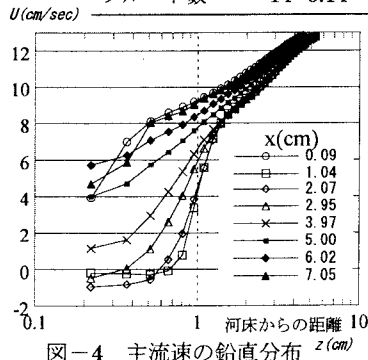


図-4 主流速の鉛直分布

図-6は最大流速 U_0 で無次元化したレイノルズせん断応力 ($\overline{u'w'}$) の流下方向変化を示す。レイノルズ応力は剥離線より若干水面方向にずれてピーク位置が続いている。最付着点上の $x/Hs=3.5$ において最大値を示しており、剥離渦の河床への衝突等により強いレイノルズ応力が生成される事が示唆される。

4. 圧力分布特性

砂漣背後の流れでは、逆圧力勾配となり、剥離流れの再付着が生じ、圧力は静水圧分布から大きくそれることが考えられ、動圧力の流れ場に与える影響が強いことが予測される。水路中央断面で2次元乱流が成立すると仮定し、 z 方向の運動方程式を積分すると、圧力 p が次のように求められる。

$$\frac{p}{\rho} = \int \frac{\partial(UW + \overline{u'w'})}{\partial x} dz + [W^2 + \overline{w'^2}] + g(h-z) \\ = p_d / \rho + g(h-z) \quad \text{式(1)}$$

ここに、 ρ は水の密度、 p_d は動圧、 h は水深、 g は重力加速度である。図-9に、 $U_0/2$ で無次元化した動圧の等値線を示す。負となる動圧は、 $x/Hs=0$ から最付着点より上流側の $x/Hs < 2.7$ で生じており、極大値は剥離線に沿っていることが分かる。また、剥離点より若干上流の $x/Hs=3.2$ から $x/Hs=5.8$ では正圧を示し、その極大値は河床面付近で示されている。

図-8は、壁面圧力が流下方向に変化する様子を示す。図中の C_p は壁面圧力係数で、次式で表される。

$$C_p = 2(p_d / \rho + g \Delta h) / U_0^2$$

ここで、 Δh は $x=0$ における水位からの水位差であるが、今回の実験において $Fr=0.14$ と緩やかな流れで計測し、水面変動をなくしたため $g \Delta h = 0$ とした。極大値は $x/Hs=4.6$ で $C_p=0.095$ を示し、極小値は、 $x/Hs=0.5$ で $C_p=-0.09$ を示す。壁面圧力がゼロになる位置は、最付着点より上流側にそれた $x/Hs=2.8$ だとすることが確認される。図中には壁面圧力に影響する式(1)の各項も併示した。図より、壁面圧力への影響は、運動量輸送項(UW)が最も大きいことが確認される。 $0 < x/Hs < 1.8$ において動圧(W^2)が C_p を 0.015 程度小さくしていることが認められる。乱れの項(w'^2)は無視できる事が分かる。

5. おわりに

砂漣背後に形成される乱流構造について基本的特性、動圧力の特性、壁面圧力から考察を行った。

しかし、ボイル渦の発生機構、3次元特性など不明な点が多く残されており、今後の課題であると考えている。

参考文献

- 1) 瀬津家久、門田章宏、新橋秀樹、倉田昌明：河床波上非定常開水路流れの時空間相関構造に関する研究、土木学会論文集、No.579/II-41, pp.125-136, 1997.11
- 2) 林俊一郎、大本照憲：Dune型固定波面上の組織的渦構造の解明、水工学論文集、第46巻、2002.2

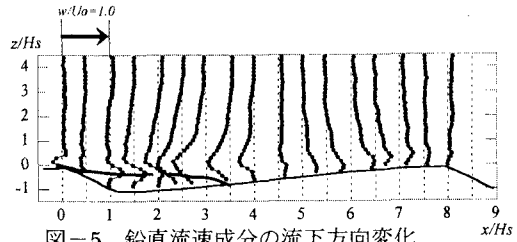


図-5 鉛直流速成分の流下方向変化

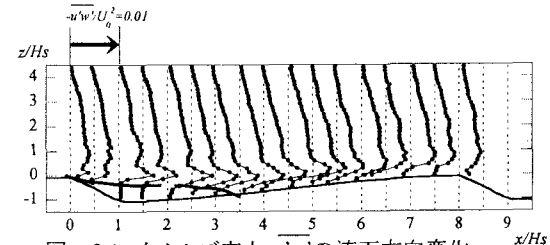


図-6 レイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ の流下方向変化

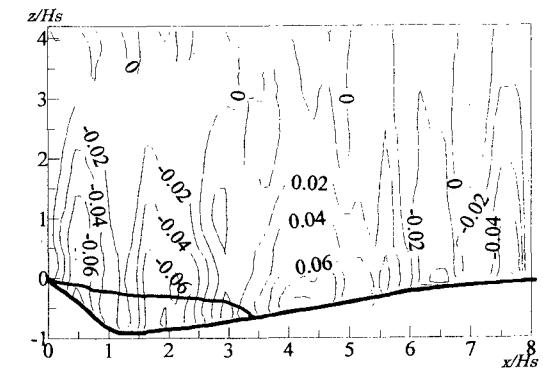


図-7 動圧力 $(p_d / (\rho U_0^2 / 2))$ の空間分布

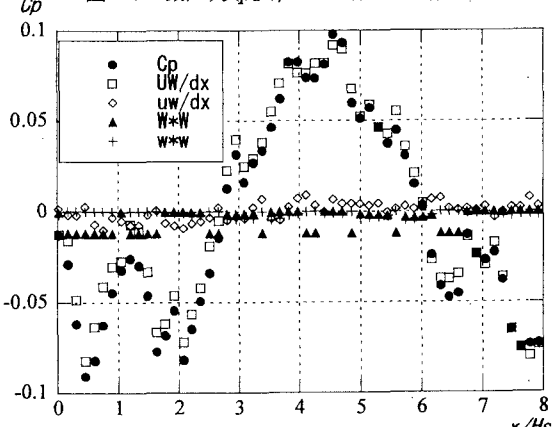


図-8 壁面圧力係数 C_p の流下方向変化