第 II 部門　　風波が開水路流れの組織乱流に及ぼす影響

京都大学大学院工学研究科　学生員　○金子　峻
京都大学防災研究所　正会員　山上　路生
九州大学総合理工学研究院　正会員　杉原　裕司
名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科　正会員　岡本　隆明

1. はじめに

河川流においては，河床近傍を乱流境界層として乱れの生成や輸送，さらには組織乱流構造が発生する．一方で水面上に風が吹くと，水面での流速シアーや風波が発生し，無風時の河床由来の乱流構造を大きく変化させると考えられる．したがって，風が存在する実河川の乱流構造を考える上では，河床に加え水面の影響が非常に重要となる．しかし，風存在下の乱流構造は，水面の時空間変化による計測の難しさ，波動成分と乱れ成分の分離を要する乱流特性分析の難しさから，十分に解明されていない．そこで本研究では，風波開水路流れにおいて水面形と流れの同時計測を実施した．得られた時系列データから波動成分と乱れ成分の分離を行い，風波場における組織乱流構造を，瞬間構造と統計量の観点から評価した．

2. 実験方法

本実験には，水路幅 40 cm，長さ 16 m の風洞付きマルチフェイズ循環式水槽を用いた．主流方向を x 軸，路床に垂直な方向を y 軸とし，y 軸の原点は底面とし，上向きを正とした．U, V はそれぞれ x, y 方向の時間平均流速を表す．本研究では，静水深 h を 8 cm，無風時の断面平均流速 U_m を 30 cm/s とし，風速 U_{a_max} は 0 m/s (無風条件), 7.0 m/s (風波条件)の 2 通りに設定して実験を行った．

計測システムの構成を図-1 に示す．2 台の高速度カメラを水路側方に設置した．それぞれ，水流の鉛直面 PIV 計測および水位変動計測に用いた．2 台のカメラを同じパルスジェネレータに接続し同時撮影を行った．その後 2 台のカメラの画像を対応させ，水位変動計測から得られた水面形を PIV 計測データに適用することで，水面形と流れの同時計測を行った．

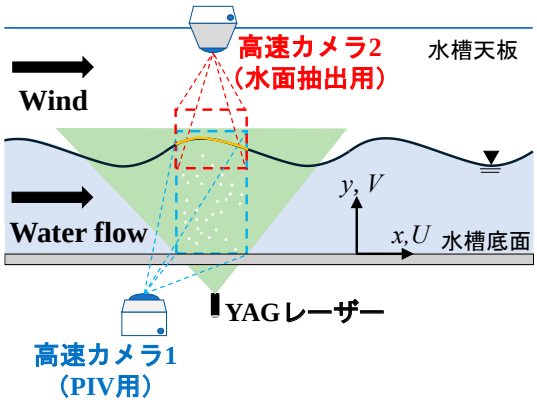


図-1　実験システム

PIV 計測では，比重 1.02，径 100 μm のトレーサー粒子を流れ場に混入させ，水路センターライン上にレーザー光シート(LLS)を照射して可視化された粒子群を高速カメラで撮影して水中の時系列流速分布を得た．水位変動計測では水面を見下ろす形で撮影し，LLS により路床から水面までの領域が明るく照らされた撮影画像に対し，輝度分布を用いた輪郭検出を施して水面座標を取得し，水路中央の水面形の時系列データを得た．

また，波動が支配的な流れ場において乱流特性を検討するためには，流速変動成分から波動成分と乱れ成分を分離する必要がある．本研究では，微小振幅波理論を適用し，波動流速 u_w, v_w の計算を行った．まず水位変動計測で得られる水位の時系列データから，ゼロアップクロス法を用いて個々の波を抽出し，各波の波高や周期を算出した．これらを用いて，微小振幅波理論より波動流速の時系列分布を求めることができる．

このように算出した波動流速と PIV 計測で得られた時間平均流速(U, V)と瞬間流速$(\tilde{u}, \tilde{v})$を用いて，瞬間流速が以下のように平均流・波・乱れ成分の 3 者に分離できる．（u_t, v_t は乱れ成分を表す．）

$$\tilde{u} = U + u_w + u_t \quad (3)$$
$$\tilde{v} = V + v_w + v_t \quad (4)$$

この分離により，波動成分と乱れ成分それぞれの流

Shun KANEKO, Michio SANJOU, Yuji SUGIHARA, Taka-aki OKAMOTO
kaneko.shun.64n@st.kyoto-u.ac.jp

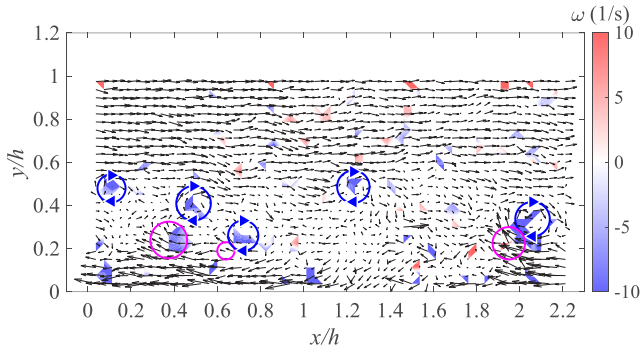


図-2 瞬間ベクトル分布$(\tilde{u}-U_c,\ \tilde{v})$ (無風条件)

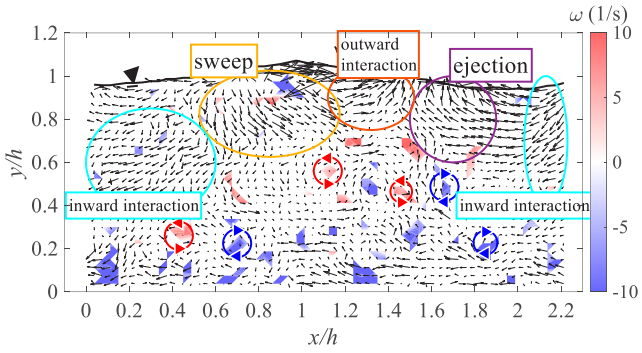


図-3 瞬間変動成分ベクトル分布(u, v) (風波条件)

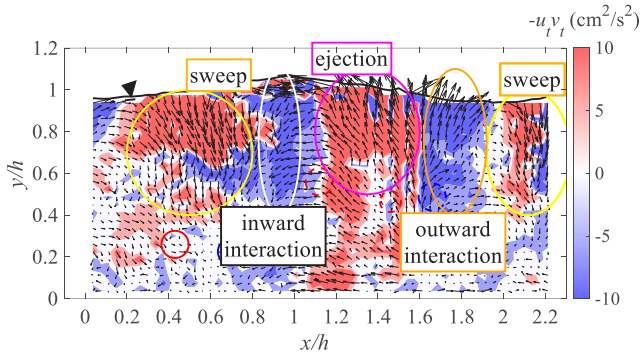


図-4 瞬間乱れ成分ベクトル分布(u_t, v_t) (風波条件)

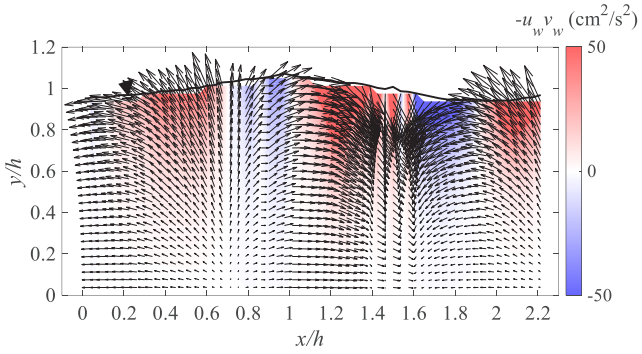


図-5 瞬間波動成分ベクトル分布(u_w, v_w) (風波条件)

速場の分析や乱流統計量の評価などが可能になる.

3. 実験結果と考察

Adrian ら [1)]の方法に基づき，風波開水路流れの組織乱流構造の可視化を行った.

図-2 に，無風条件の基準移流速度 U_c =0.9 U_s に対する相対座標における瞬間ベクトル$(\tilde{u}-U_c,\ \tilde{v})$と渦度コンターを示す．半水深付近で複数の時計回りの渦が見られた. また渦の左下に瞬間的な上昇流(ejection)を伴うものが見られ，開水路流れに特有のヘアピン渦のパケット構造が確認された.

図-3 に，風波条件の流速変動成分のベクトル(u, v)と渦度コンターを示す．無風時と異なりヘアピン渦のパケット構造は見られなかった一方，反時計回りの渦が複数確認された．さらに水面付近で強い上昇流と下降流が形成された．風波が発達するとこれらの上昇流と下降流がヘアピン渦のパケット構造の形成を抑制することが考えられる．またこの上昇流と下降流のペアは，瞬間レイノルズ応力$-uv$ の正領域における上昇流(ejection, $u<0, v>0$)と下降流(sweep, $u>0, v<0$)，負領域における上昇流(outward interaction $u>0, v>0$))と下降流(inward interaction $u<0, v<0$)が，sweep → inward interaction → ejection → outward interaction のサイクルとなって現れている.

図-4 に，波と乱れ分離後の乱れ成分ベクトル(u_t, v_t)と瞬間乱れレイノルズ応力$-u_tv_t$ コンターを示す．**図-3** と異なり，sweep→outward interaction→ejection→inward interaction の上昇流・下降流サイクルが見られた．これは，乱れ成分により発生する上昇流・下降流の組織構造が，波動成分により大きく変化して流速変動成分の組織構造に現れたと考えられる.

図-5 に，波と乱れ分離後の波動成分ベクトル(u_w, v_w)と瞬間波動レイノルズ応力$-u_wv_w$ コンターを示す．**図-4** と比較すると，(u_t, v_t)分布で上昇流・下降流が見られる領域でベクトルが異なる向きを示し，上述の乱れ成分と瞬間流速成分の組織構造の相違に影響したと考えられる.

4. おわりに

本研究では風波開水路流れを対象に 2 台の高速カメラを用いた波と流れの同時計測を実施し，風波が開水路流れの組織乱流構造に与える影響について検討した.

参考文献

1) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins, C.D.: Voretx organization in the outer region of the turbulent boundary layer, J. of Fluid Mechanics, Vol.422, pp.1-54, 2000.