第Ⅱ部門　　逆風下の開水路流れの乱流構造に関する基礎的研究

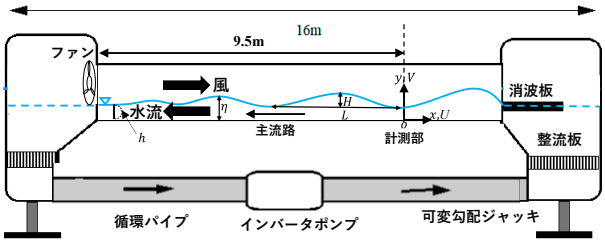
京都大学大学院工学研究科　学生員　○天崎　秀俊
京都大学大学院工学研究科　学生員　金子　峻
京都大学防災研究所教授　正会員　山上　路生
名城大学理工学部准教授　正会員　岡本　隆明

1．はじめに

暴風時の河川の駆動源は，重力に風によるせん断力が加わるため，従来の潤辺水理学の知見だけでは抵抗則や乱流構造を理解できない．特に風波を伴う場合，波動の影響が含まれるため，現象は極めて複雑にある．このような風波を伴う開水路流れについては複数の既往研究[1)]があるが，逆風条件を扱ったものは少ない．また 計測技術の制約から，常に水層となるトラフレベル以下の領域を議論しているそこで，本研究では逆風を伴う開水路流れを対象に，風波のトラフから界面までの領域も含めた乱流生成機構の解明を目的として， 2 台のカメラを用いた波と乱れの同時計測を実施した

2.　実験方法

本実験には，マルチフェイズ循環式水槽を用いた．この装置では水流と気流を同時独立制御できる． 水路部の幅は 40 cm，長さは 16 m である．図−1 に水路の全体構成を示す．なお図の座標系は流下逆方向をx軸，路床に垂直な方向をy軸とした．y軸の原点は底面とし，路床から水面に向かって正となるようにした．そして流れ場の特性を調べるために PIV による流速計測を実施した． 2 台のカメラ（1 台は水面抽出用）をパルスジェネレータに接続することで同時撮影を行った．その後同時刻の 2 台のカメラ画像を対応させ， 得られた流速データに適用した． 各時刻について水面位置よりも上方の領域の流速データ， すなわち空気層と判定された領域での流速を無効値とすることで，波と流れの同時計測を行った．



図−1　実験水路の構成

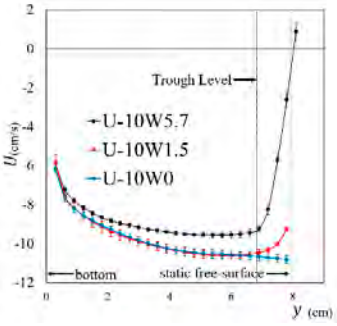
3.　実験結果

(1) 時間平均流速の水深方向分布

図−2 は得られた時間平均流速の水深方向分布である．水面付近では風速が大きくなるにつれて減速の度合いが大きくなり， より深く風の影響が出ていることがわかる． 風波が発生するケース(U-10W5.7)は領域全体において無風時(U-10W0)の方が流速が大きく， 発生しないケース(U-10W1.5)においては底層や中層で風がある方が流速が大きくなった．よって風波が発生せず吹送だけの場合においては逆風によって底層や中層付近で水流が加速されていることが分かった．

(2) 波と乱れの分離

本節では波と乱れを分離した結果について述べる．本研究で扱う波動が支配的な流れ場において乱流特性を考えるためには，波動成分と乱れ成分を分離して考える必要がある．本研究では PIV で得られた瞬間流速$(\tilde{u},\tilde{v})$を時間平均流速(U,V)，波動流速(u_w,v_w)，乱れ(u_t,v_t)に分解した．波動流速は水位変動データを微小振幅波理論に適用して求めた．図−3 は，風波



図−2　時間平均流速の鉛直分布(U-10)

Hidetoshi AMASAKI, Syun KANEKO, Michio SANJO, Taka-aki OKAMOTO
amasaki.hidetoshi.84p@st.kyoto-u.ac.jp

が発生するケース（U-30W5.7）を対象に，波と乱れの分離後のU_{*s}で無次元化したレイノルズ応力分布を示す．乱れによるレイノルズ応力$-\overline{u_t v_t}$は，底面付近で負値がみられる．水面付近では向かい風による大きな減速が発生するため，大きな負値がみられる．本研究では主流方向の座標を風向きに正としているため，座標変換すると底面のレイノルズ応力の符号は正値となる．一般に無風の開水路流れでは底面での乱れの発生を受けて，レイノルズ応力は底面で大きな正値をもち，水面にかけて線形的に減少する．逆風開水路流れにおいても底層では底面起因の乱流が発生することが示唆される．

次に，風波開水路におけるエネルギー輸送について着目する．波のエネルギー生成に使われるエネルギーG_W及び波のエネルギー生成に使われるエネルギーG_tは次式で表せる[2)]

$$(1)\ G_W = [(-\overline{u_w v_w}) + (-\overline{u_w v_t})]\frac{\partial U}{\partial y}$$

$$(2)\ G_t = [(-\overline{u_t v_t}) + (-\overline{u_t v_w})]\frac{\partial U}{\partial y}$$

G_Wは平均流から波へのエネルギー輸送，G_tは平均流から乱れへのエネルギー輸送を意味する．

図-4 はそれぞれG_WとG_tの分布を表す．これらの図からで，y/h >0.9 でG_Wが正，G_tが負となる．y/h >0.9 からは乱れから平均流，平均流から波へエネルギーが輸送されていることになる．一方で底面付近ではG_Wの生成は見られず波の影響は受けていないことが分かる．

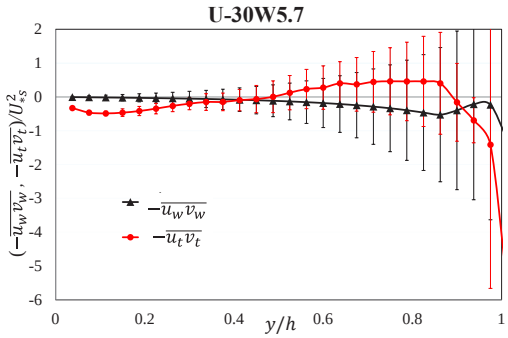


図-3　無次元レイノルズ応力分布

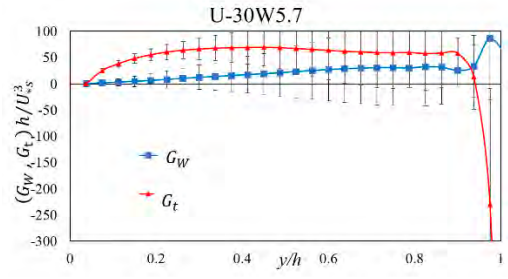


図-4　エネルギー輸送項の分布

図-5 にこれまでの結果をもとに構築した現象モデルを示す．逆風開水路流れでは，風による水面付近の流速の減速が見られる．また，乱れのレイノルズ応力は，底面付近ではわずかに負を示し，広い範囲でも負の値を示し，波の影響が深くまで及ぶ．風波が完全に発達している場合は，水面付近においては乱れから平均流，平均流から波へとエネルギーが輸送される．すなわち，平均流を介して乱れが風波にエネルギーを供給する．

4.　おわりに

以下に得られた主要な結果をまとめる．

1) 波と流れの同時計測により，トラフ以上の領域を含む時間平均流速の水深方向分布を得た．風波特性などによって時間平均流速の水深方向分布の傾向が変化することが分かった．

2) 波と乱れの分離を行い，波と乱れそれぞれのレイノルズ応力の水深方向分布を得た．すべての統計量が水面付近で大きな変化を示すが，風速の大きさによって分布の傾向が異なることが確認できた．

3) 波と乱れの分離解析よりエネルギーについては，風波が生成している場合は水面付近で乱れから平均流，平均流から波へ輸送されていることが分かった．

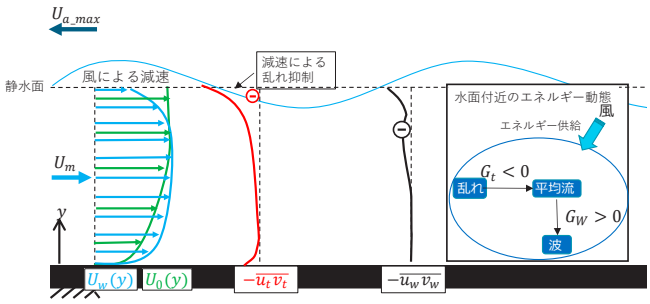


図-5　逆風開水路流れの現象モデル

参考文献

1) 山上路生・禰津家久：風波・開水路混成流における組織乱流渦とエネルギー輸送動態の解明，土木学会論文集B，Vol.65, No.3, pp.203-216, 2009.

2) Jiang, J.Y., Street, R.L. and Klots, S.P.: A study on wave-turbulence interaction by use of a nonlinear water wave decomposition technique, *J. Geophysical Res.*, Vol.95, pp.16037-16054, 1990.