

逆風が開水路流れに与える影響に関する実験的研究  
Experimental study of counter-wind effect on open-channel flow

○金子 峻・山上 路生・天崎 秀俊・岡本 隆明・松本 知将  
○Shun KANEKO, Michio SANJOU, Hidetoshi AMASAKI, Takaaki OKAMOTO,  
Kazumasa MATSUMOTO

In this study, flume experiments were conducted to reveal the counter-wind effect on open channel flows. We measured the velocity profile and distribution of the free-surface elevation simultaneously by using two high speed cameras in counter-wind-induced open channel flow. As results, water velocity was found to be greatly decelerated near the free-surface by counter-wind. In addition, the instantaneous velocity could be decomposed into mean current, wave, and turbulent components by using the free-surface shape data. It results in that both Reynolds stresses of wave and turbulence components were negative near the free-surface. It is also suggested that the energy is transferred from mean current to wave, whereas it is transferred from turbulence to mean current near the free-surface.

### 1. はじめに

風波の存在は水面下の乱流構造を大きく変化させ、水・空気界面の物質・運動量輸送機構に大きく影響を与える。そのため、流れと波の関係の解明は、環境科学的に非常に重要である。一方で、風波による界面変動は可視化計測が難しく、風波発生時の開水路流れの平均流・乱流構造は十分には理解されていない。特に逆風下ではそれらが特徴的に変化することが考えられる。そこで本研究では、逆風を伴う開水路流れに対し2台のカメラを用いて水面形と流れの同時計測を行い、水面が時空間的に変動する風波開水路流れの平均流・乱流構造について分析を行った。

### 2. 実験方法

本実験には、水路幅40cm、長さ16mの風洞付きマルチフェイズ循環式水槽を用いた。流下方向を $x$ 軸、水路床に垂直な方向を $y$ 軸とし、 $x$ 軸は風の方向を正に、 $y$ 軸の原点は底面とし、路床から水面に向かって正とした。 $U, V$ 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8cm、無風時の断面平均流速 $U_m$ を-30cm/sとし、風速 $U_{a\_max}$ は0~10m/sで6通りに系統変化させて実験を行った。

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

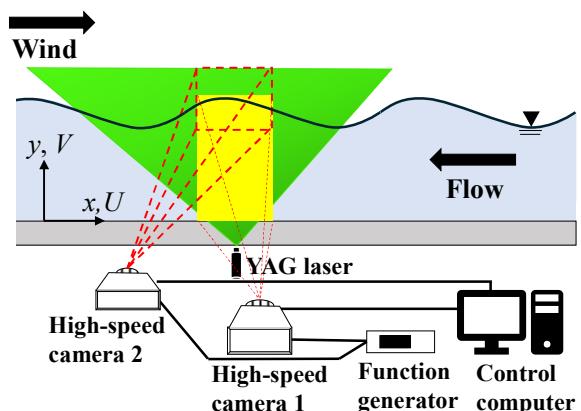


図-1 実験システム

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。各条件に対して5回計測を行い、それらの平均値をもとに考察した。

PIV計測では、比重1.02、径100μmのトレーサー粒子を流れ場に混入させ、水路のセンターライン上にLLSを照射して可視化された粒子群を高速度カメラで撮影した。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て、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、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  $H$  や周期  $T$  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。 $(u_t, v_t)$  は乱れを表す。)

$$\tilde{u} = U + u_w + u_t \quad (1)$$

$$\tilde{v} = V + v_w + v_t \quad (2)$$

この分離により、波動成分と乱れ成分それぞれの乱れ統計量などを定量評価することができ、水・空気界面や、平均流・波・乱れ間のエネルギー輸送について考えることができる。

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 時間平均主流速

図-2 に、時間平均主流速  $U$  の水深方向分布を示す。なお、 $U$  は断面平均流速  $U_m$  で、 $y$  は静水深  $h$  で無次元化して表示している。これより、逆風が存在すると水面付近で減速が発生し、風速の増加とともに減速が大きくなる様子が確認された。

#### (2) レイノルズ応力分布

図-3 に、波と乱れの分離後の、水面摩擦速度  $U_{*s}$  で無次元化したレイノルズ応力の水深方向分布を示す。水面付近では、乱れによるレイノルズ応力  $-\bar{u}_t v_t$  と波によるレイノルズ応力  $-\bar{u}_w v_w$  はともに大きな負値をとった。一方半水深以下の底面に近い領域では  $-\bar{u}_w v_w$  はゼロに近づき、波の影響は半水深以下まではあまり及ばないことが示唆された。

#### (3) エネルギー輸送

波と乱れの分離後の時間平均流速のエネルギー輸送方程式の生成項は、以下のように表される<sup>1)</sup>。

$$G_{MKE} \cong -[(-\bar{u}_w v_w) + (-\bar{u}_w v_t) + (-\bar{u}_t v_t) + (-\bar{u}_t v_w)] \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3)$$

右辺 1,2 項は波のエネルギー、3,4 項は乱れのエネルギー生成に使われるエネルギーである。それぞれの符号を反転したものを  $G_W, G_T$  と定義する。

図-4 に、波と乱れのエネルギー生成項の水深方向分布を示す。水面付近で顕著に  $G_W$  が正、 $G_T$  が負となる。このことから水面付近では、風で誘起された時間平均流から波にエネルギーが供給され、逆に乱れは平均流にエネルギーを輸送していることが示唆された。本研究ではトラフ上の領域につ

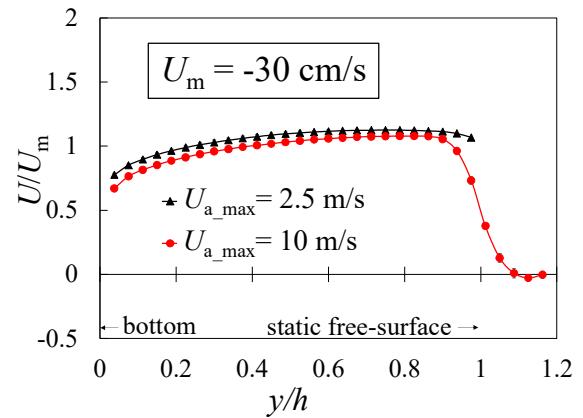


図-2 時間平均主流速  $U$  の水深方向分布

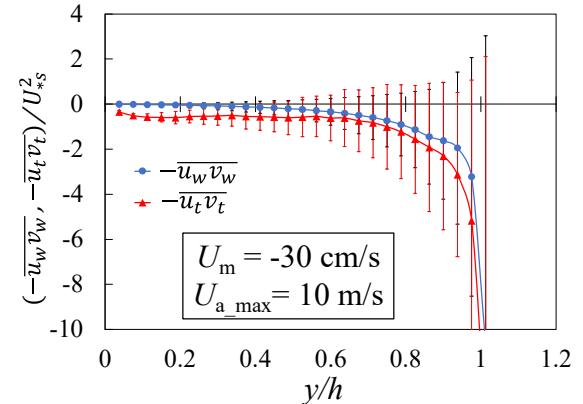


図-3 レイノルズ応力の水深方向分布

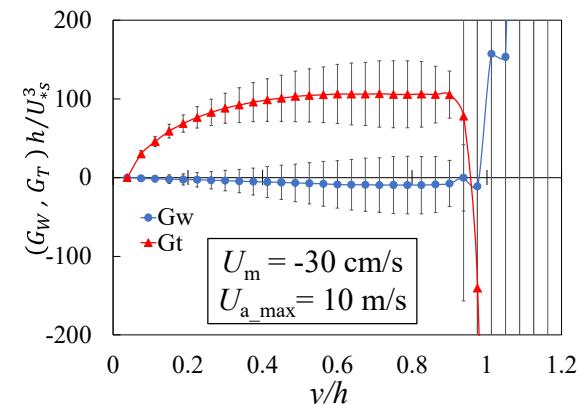


図-4 エネルギー生成項の水深方向分布

いても計測できたが、水層の存在が間欠的でサンプル数が少ないとため、結果のばらつきが大きい。この点は今後の課題とする。

### 4. おわりに

本研究では、2 台のカメラを用いた波と流れの同時計測を実施し、逆風作用下の開水路流れの平均流・乱流特性について分析を行った。

#### 参考文献

- 1) Jiang, J.Y., Street, R.L. and Korts, 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.