

# 第 部門 開水路流と逆向きに水面に風が作用する逆流界面場における乱れ構造について

京都大学工学部地球工学科 学生員 福谷彰 京都大学大学院工学研究科 フェロー 楠津家久  
 京都大学大学院修士課程 学生員 垂井晃一 京都大学大学院博士課程 学生員 吉田圭介

## 1. はじめに

自然界では水流上に吹く風の向きは一様ではなく、例えば河川の河口部付近では海風により水流とは逆向きに強い風が吹く逆流界面場が発生する。一方、従来から開水路流、風波場、順流場（水流と風の方向が同一）においては様々な研究が行われてきたが、逆流場を扱った研究は数少なく、波が立たないような風シアアが弱い流れを扱った研究はあるが、風シアアが強く風波が発生している流れ場での主流速特性や乱流特性についての研究はあまり行われていない。そこで本研究では逆流場において系統的に実験条件を変化させて、水路中央鉛直断面においてレーザー流速計（LDA）を用いた計測によって、順流場における乱流特性との比較検討から逆流場における乱流特性について考察を試みる。

## 2. 実験方法および実験条件

本実験は、全長 16m、幅 40cm、高さ 50cm の風洞付き水路を用いて行った。図-1 にその概要図を示す。座標系は水の流下方向を  $x$  軸、底面を原点として上向きに  $y$  軸、静水時の界面を原点として上向きに  $z$  軸とした。流速変動成分は水流の流下方向成分を  $u$ 、鉛直方向成分を  $v$  とした。瞬間流速 ( $u, v$ ) の測定には、300W の 4 ビーム後方散乱型 2 成分レーザー流速計 (Dantec 社製 LDA) を用いた。測定箇所は、風波と開水路流ともに十分発達した空気流の吹き出し口から 9m、水流の上流端から 7m の地点で水層および空気層の水路中央断面における計測を行った。表-1 に実験条件を示す。 $h$  は静水時の水深、 $B$  は水路幅、 $U_{a,max}$  は空気層での最大風速、 $U_{*a}$ 、 $U_{*w}$  は空気層界面近傍、水層底面近傍でそれぞれ対数則を適用して求めた摩擦速度である。添字  $a, w$  はそれぞれ空気層及び水層に関する量を示す。本実験では水流のフルード数  $Fr = U_w / \sqrt{gh}$  が約 0.2 と 0.43 となるような二通りの流量を与えた開水路乱流上に、水流とは逆向きに各々 6 段階の風量を系統的に変化させて、合計 14 通りの条件 (Run1~Run14) で行った。また、全ケースにおいて水深  $h = 7$  cm (一定) とした。

## 3. 実験結果および考察

図-2 は水層における流下方向乱れ強度  $u'_w$  および鉛直方向乱れ強度  $v'_w$  の鉛直方向の分布である。乱れ強度  $u'_w, v'_w$  はそれぞれ摩擦速度  $U_{*w}$  で無次元化している。また、図には Nezu and Nakagawa (1993)<sup>1)</sup> による滑面開水路流れの半理論式を併示した。風速の小さいケース

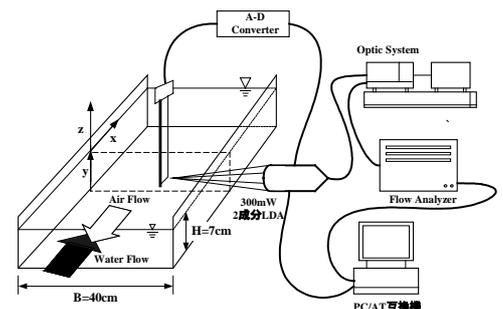


図 - 1 実験装置図

表 - 1 実験条件表

ケース名	$U_{w,mean}$ (cm/sec)	$U_{*w}$ (cm/sec)	$Fr$	$U_{a,max}$ (m/sec)	$U_{*a}$ (cm/sec)	$U_s$ (cm/sec)	$B/h$
Run1	15.2	0.829	0.18	-	-	18.2	5.71
Run2	16.8	0.886	0.20	1.15	5.79	16.0	5.71
Run3	16.7	0.899	0.20	1.90	9.08	13.8	5.71
Run4	16.6	0.916	0.20	2.28	11.0	13.3	5.71
Run5	16.8	0.914	0.20	2.67	12.4	12.4	5.71
Run6	16.6	0.891	0.20	3.43	15.7	10.6	5.71
Run7	16.4	0.891	0.20	4.17	18.6	9.54	5.71
Run8	35.4	1.81	0.43	-	-	36.9	5.71
Run9	35.2	1.78	0.43	1.18	5.53	34.9	5.71
Run10	35.7	1.86	0.43	2.65	12.0	29.8	5.71
Run11	35.1	1.75	0.42	3.43	15.4	28.1	5.71
Run12	35.1	1.86	0.42	4.22	21.2	26.2	5.71
Run13	34.8	1.79	0.42	4.98	25.2	25.5	5.71
Run14	34.5	1.70	0.42	5.77	29.5	24.2	5.71

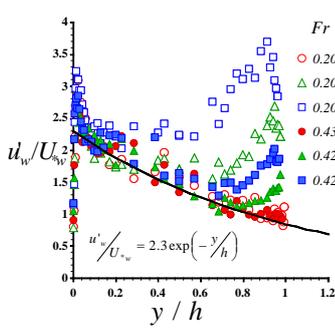


図-2 水層乱れ強度分布

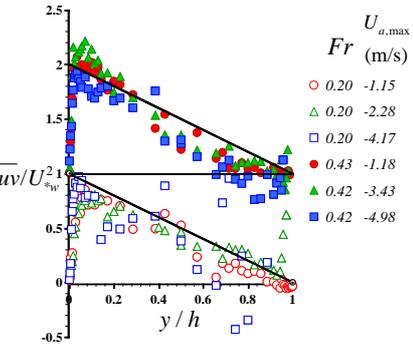
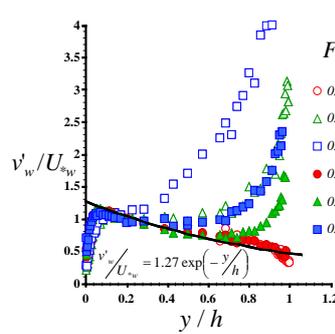


図-3 水層レイノルズ応力分布

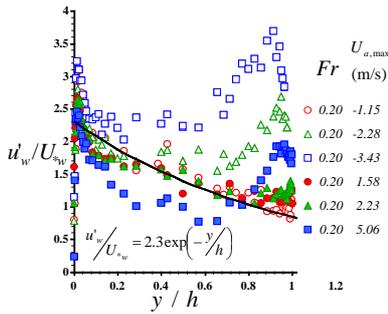
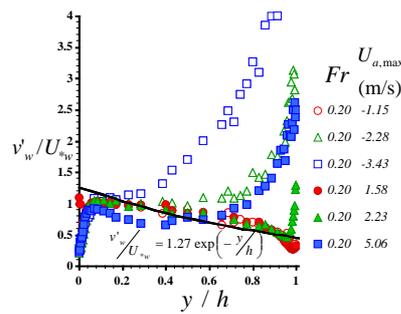


図-4 水層乱れ強度分布



(Run1, Run8)では全域で半理論式とよく一致しているが、風速が増加すると $u'_w, v'_w$ ともに底面付近まで乱れが増加する傾向を示している。また、同程度の風速において、水流のフルード数が小さいケースでは大きいケースと比べて空気流と水流の相対速度が小さいにも関わらず、乱れの増加が顕著であり、風シアーの影響をより強く受けている。図-3は水層におけるレイノルズ応力の鉛直方向分布を示したものである。水流のフルード数 $Fr=0.43$ のケースは上方へ1単位ずらして表示した。レイノルズ応力は水層の底面摩擦速度 $U_{*w}$ で無次元化をしている。風速の小さいケースでは、レイノルズ応力の三角形分布に比較的よく一致しているが、風速が増加するに従って下方へずれ、負の値を示している。これは、風速の増加に伴って空気層から水層への乱れ運動量の輸送が増加しているためと考えられる。図-4は水流のフルード数 $Fr=0.2$ の逆流場及び順流場における水層の乱れ強度 $u'_w, v'_w$ の分布を示したものである。図にはNezu and Nakagawa (1993)<sup>1)</sup>による半理論式を併示した。なお、順流場のデータはすべて既往研究<sup>2)</sup>のものである。図より、風速の最も小さいケースでは順流と逆流に違いは見られないが、風速を大きくしていくと同程度の風速において逆流場の方が大きな乱れを示している。また、半水深付近において、順流場では乱れが減少する傾向があることに対して、逆流場では半水深以下でも乱れが増加している。これは、順流場では半水深付近で流速勾配が小さくなるのに対し、逆流場では半水深付近で流速勾配が大きくなるためであると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究ではレーザー流速計(LDA)を用いた計測によって、逆流場における乱流特性について考察を行った。その結果、逆流場では順流場よりも風シアーの影響を強く受け、半水深以下でも乱れ強度が増加した。また、逆流場では水流の流速が大きくなると風シアーの影響が小さくなった。以上のことから逆流場は順流場と異なった乱流構造を持つことが実験的に示唆され、今後、組織構造の面からも解明していきたい。

#### (参考文献)

- 1) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 2) 禰津家久・吉田圭介・垂井晃一：水面上に風シアーが存在する開水路流場における水層乱れ構造と水面変動に関する研究，水工学論文集，第48巻，pp.517-522，2004