

京都大学大学院
京都大学大学院博士課程

フェロー 桶津家久
学生員 ○吉田圭介

京都大学大学院
京都大学大学院修士課程

正会員 牛島省
学生員 濱田悟

1. はじめに

水／空気界面を通して行われるスカラー輸送機構を解明するには、特に水層界面近傍での濃度境界層の流体挙動を明らかにすることが重要である。一方、水・空気界面では水流と空気流の相互作用が存在することも指摘されている¹⁾。本研究は、2成分高精度レーザー流速計(LDA)を用いて2次元流速場の計測を行い、既往よりあまり研究対象とされてこなかった水・空気2層流場における空気層界面乱流構造に関して実験的な検討をおこなったものである。

2. 実験方法および実験条件

本実験で使用した水路は全長16m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型循環式風洞開水路である。空気流の変動流速は300mW Ar-ion laser LDAシステム(図-1参照)を用いて計測した。表-1に水理条件を示す。ここで、 h_w は水深、 h_a は空気層厚、 B は水路幅、 Q は水流量、 Fr は水流のフルード数、 $U_{a,max}$ は空気側の最大風速、 U_{*a} 、 U_{*w} はそれぞれ空気層および水層界面での流速分布に対数則を適用して評価された摩擦速度である。水深 h_w を固定して最大風速を3通り(Wind, 弱→中→強)、開水路フルード数を3通り(Open)変化させることで、混成水理条件を9ケース(Combined)を形成した。座標系は流下方向を x 軸、静水面より上向きを y 軸とし、それぞれに流速変動を u, v と定義した。また、LDA計測断面は水路中央とし、風波場のケースでは水路は平坦で閉鎖領域場(タンク)とし、他のケースでは等流状態を実現するために Fr に応じて油圧ジャッキにより水路勾配を調整した。

3. 実験結果および考察

図-2には、混成ケースにおける風速分布を境界面からの粗面外部変数表示で示した。同図には、風波場空気層界面で成立する次式の粗面对数則も併示した²⁾。

$$\frac{U_a - U_s}{U_{*a}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_a} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 U_s は表面流速、 y_a は粗度高さを示す。同図よ

り、ケースを問わず無次元距離 $y/y_a = 10^2 \sim 10^3$ 付近で粗面对数則が成立することがわかる。また、ケースによっては界面近傍で粘性底層が観察され、一方、界面から離れた場所ではウェーク成分も観察される。

図-3には、風波場(Wind)および混成場(Combined)ケースにおける空気層界面摩擦速度を示した。同図より、風速およびフルード数の相違により界面近傍での摩擦速度が異なることがわかり、境界面でのせん断応力に変化することが推察される。一方、図-4には、風波場(Wind)および混成場(Combined)ケースにおける空気層界面粗度高さを示した。同図より、一般的に粗度高さは摩擦速度に対して下に凸な分布形を示すことがわかる。こ

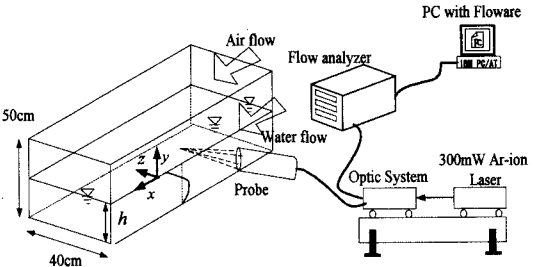


図-1 LDA計測装置

表-1 実験条件表

Case	h_w (cm)	B (cm)	h_a (cm)	Q (l/s)	Fr	$U_{a,max}$ (m/s)	U_{*a} (cm/s)	U_{*w} (cm/s)
Open	C01			4.64	0.2			
	C02			11.6	0.5			
	C03			18.6	0.8			
Wind	C10					1.11	5.023	0.189
	C20					2.54	10	0.369
	C30					3.93	17.38	0.631
Combined	C11	7	40	4.64	0.2	1.11	4.43	
	C12			11.6	0.5	1.11	4.35	
	C13			18.6	0.8	1.11	3.94	
	C21			4.64	0.2	2.54	10.58	
	C22			11.6	0.5	2.54	9.1	
	C23			18.6	0.8	2.54	9.23	
	C31			4.64	0.2	3.93	16.77	
	C32			11.6	0.5	3.93	15.58	
	C33			18.6	0.8	3.93	13.57	

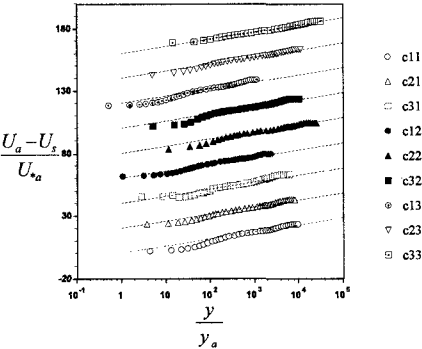


図-2 空気層風速分布 U_a

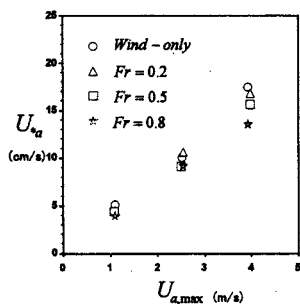


図-3 空気層界面摩擦速度 $U_{a,i}$

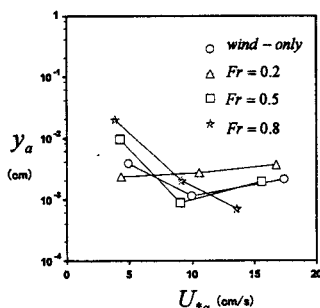


図-4 空気層粗度高さ y_a

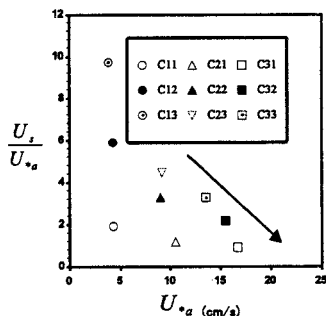


図-5 表面流速 U_s

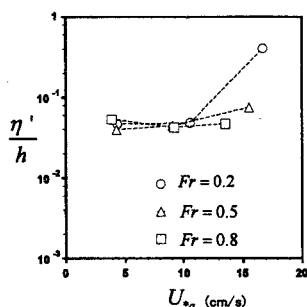


図-6 界面変動強度 η'

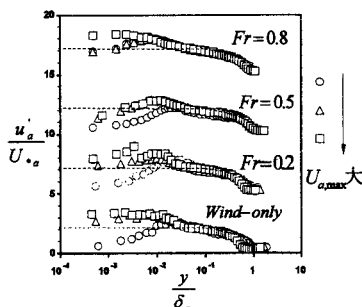


図-7 乱れ強度 $u'/U_{a,i}$

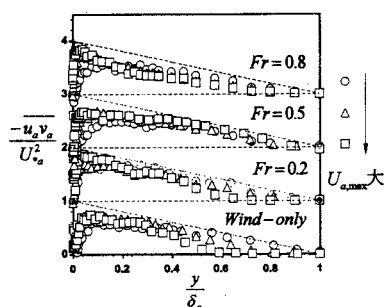


図-8 レイノルズ応力 $-u_a v_a / U_{a,i}^2$

これは、低摩擦速度では界面状態が滑面状態であり、粗度高さとしての定義が困難であるからである。これに関して、Nezu et al. (2001)³⁾は固定壁面上の水流との相似で、風波に関して滑面状態と粗面状態と異なる対数則が成立することを指摘している。図-5には混成場ケースにおける表面流速の分布を示した。ただし、本研究における表面流速は本来の定義と異なり、近似的にLagrange的に決定されたものである⁴⁾。同図より、表面流速は風速とフルード数に応じてほぼ決定され、特に風シアーが卓越したケース(C11,C21,C31)では風波場における表面流速の平衡値⁵⁾ $U_s/U_{a,i} \rightarrow 0.55$ に漸近することがわかる。図-6には混成場(Combined)ケースにおける界面変動強度 η' を示した。同図より、水面変動は界面摩擦速度 $U_{a,i}$ に対して粗度高さの分布と同様に下に凸型の放物線状の分布をなすことがわかる。これは水流と空気流の比に応じて、界面状態が変化することを示唆していると考えられる。図-7には風波場(Wind)および混成場(Combined)ケースにおける空気層の流下方向乱れ強度 u'_a を示した。ただし、 δ_a は空気層乱流境界層厚であり、空気層におけるレイノルズ応力がゼロとなる位置から界面までの距離と定義した。また、瀬津の乱れに関する普遍関数も併示した。同図より、界面近傍まで($y/\delta_a > 0.1$)は普遍関数表示が成立している。一方、界面ごく近傍ではフルード数が増大する(Wind-only $\rightarrow Fr=0.2 \rightarrow Fr=0.5$)と乱れ強度は減少している。これは、界面における水面変動と大きく関係があり、界面変動が増加しているケース(例えば C31)では乱れも増大することに相関している。一方、図-8には風波場(Wind)および混成場(Combined)ケースにおける空気層のレイノルズ応力 $-u_a v_a$ を示した。同図より、風波場と同様に³⁾界面近傍ではレイノルズ応力は減少することが観察される。これは界面において空気流から水流へと運動量が輸送されているからである。また、ケースによって分布形が異なるのは、水流と空気流の相対速度に依存して運動量が輸送されるためと考えられる。

4. おわりに

本研究は水・空気2層流における空気層界面の乱流構造に関して、基礎的な実験的検討を行ったものである。(参考文献)

- 1) 瀬津家久, 吉田圭介, 池田大輔, 水工学論文集, Vol.46, pp.547-552, 2002.
- 2) Wu, J. *Fluid Mech.*, Vol.68, pp.49-70, 1975.
- 3) Nezu et al., *3rd Int. Symp. on Measurements. Tech. for Multiphase Flows*, pp.211-220, Fukui, Japan, 2001.
- 4) 吉田圭介, 京都大学工学研究科修士論文, 2002.
- 5) 中山忠暢, 京都大学工学研究科博士論文, 2002.