

京都大学工学部地球工学科
京都大学大学院修士課程

学生員 ○垂井晃一
学生員 池田大輔

京都大学大学院工学研究科 フェロー 楠津家久
京都大学大学院博士課程 学生員 吉田圭介

1. はじめに

水・空気2層流の乱流現象は界面近傍における水・空気乱流の相互作用によるものであるが、その理論的解析が困難であることが知られ、従来より実験や数値計算による解析が数多く行われてきた。実験的手法による既往の研究では、主に点計測による流れ場の鉛直断面内2次元時間平均構造に関して詳細に研究がなされ、平均流速、乱れ強度などについて検討が加えられた。しかし、水・空気流混成場の乱流構造を理解するには、その境界である界面近傍における流れ場の瞬間的挙動を詳細に把握することが重要である。本研究ではPIV(Particle-Image Velocimetry)による瞬間構造の解析を行うことで、風波場及び開水路混成場に関してその時空間乱流構造を解析して、界面現象を実験的に解明する。

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。図-1に示すように水層の瞬間構造はPIVを用いて水路中央断面における流れを1/30秒コマずつ計測した。表-1に水理条件を示す。ここで、 h は水深、 Fr は水流のフルード数、 $U_{a,max}$ は空気側の最大風速、 $U_{w,mean}$ は水層の断面平均流速、 U_s, U_b はそれぞれ水層界面及び底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、 H_s は有義波高、 λ は平均波長、 f_p は風波の卓越周波数である。本研究では水層に一定の流量(3l/sec)を与えた風波・開水路混成場において水面形状が滑面・3次元的さざ波・2次元重力波となるように最大風速 $U_{a,max}$ を3通り変化させた条件(Q3V1, Q3V2, Q3V3)および無風の条件(Q3V0)、さらに比較実験として上流・下流端を閉めきった閉鎖場において、水面形状が3次元的さざ波・2次元重力波となるように最大風速 $U_{a,max}$ を2通り変化させた条件(Q0V2, Q0V3)の計6ケースの実験を行った。水面形状については楠津・中山の研究を参考にして¹⁾デジカメで撮影した。座標軸は流下方向を x 軸、底面より上向きを y 軸とし、流下方向への流速成分を $\tilde{u}$ 、鉛直上向きへの流速成分を $\tilde{v}$ とした。

3. 実験結果および考察

図-2はケースQ3V3においてPIV画像を解析して得られた瞬間流速ベクトル、瞬間レイノルズ応力コンター及び瞬間渦度コンターの時系列である。ただし、時系列の基準時間を $t = 0(\text{sec})$ 、時間間隔は1/15(sec)である。瞬間レイノルズ応力は U_{ω}^2 で、渦度は U_{ω} 及び h で無次元化している。渦度は反時計回りを正と定義した。ベクトル図、コンター図ともに、図の縦軸は水深方向の y/h である。また、図中の界面形状はPIV画像より得られた。同図より、本PIV解析は光の乱反射によるエラーベクトルが存在する界面極近傍を除いては的確に流速ベクトルを算定している様子が伺える。

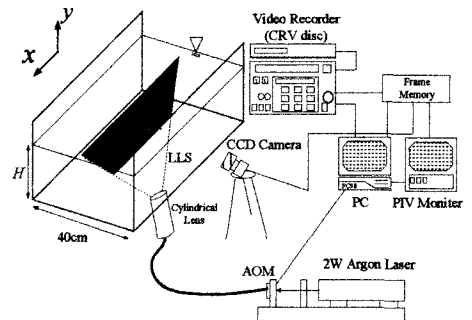


図-1 可視化及び画像解析装置(PIV)

表-1 実験条件表

Case	h (cm)	Fr	$U_{a,max}$ (m/sec)	$U_{w,mean}$ (cm/sec)	U_s (cm/sec)	U_b (cm/sec)	H_s (cm)	λ (cm)	f_p (Hz)
Q3V0	12	0.073	—	7.92	—	0.492	—	—	—
Q3V1		0.076	2.42	8.23	0.47	0.491	—	—	—
Q3V2		0.081	4.25	8.80	0.53	0.577	0.64	8.01	5.2
Q3V3		0.079	7.73	8.55	1.44	0.600	1.20	16.28	3.5
Q0V2		—	4.31	0.00	0.54	—	0.74	9.81	4.4
Q0V3		—	6.51	0.00	1.32	—	1.24	17.20	3.1

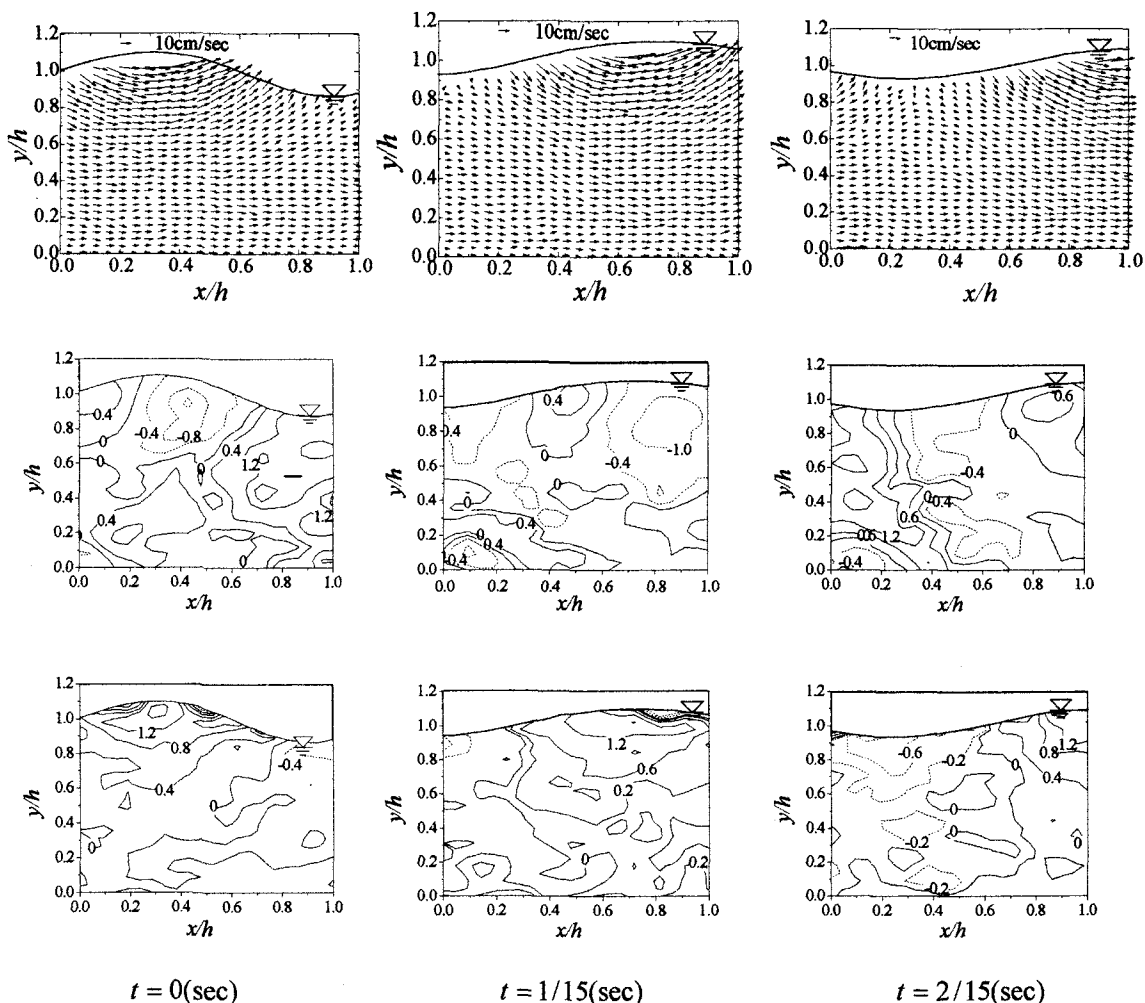


図-2 風波の瞬間構造(Case:Q3V3:混成場)

(上:瞬間流速ベクトル $(\vec{u}, \vec{v})$, 中:瞬間レイノルズ応力コンター $-uv$, 下:瞬間渦度コンター Ω)

瞬間流速ベクトル図より、波の位相の変化による流速ベクトルの変化が見られ、クレスト(波の峰)下で流下方向の流速が最も大きく、逆にトラフ(波の谷)下では流下方向流速が最も小さいことが観察される。また、底面付近まで波による流速変動が見られる。コンター図からは、瞬間レイノルズ応力は界面付近で大きな値がみられ、それが風波の位相の交代によりレイノルズ応力の正負が交代していく様子が観察される。また、渦度については、クレスト下で高い正の領域が、トラフ下で高い負の領域が見られる。界面付近の値の大きい領域は風による波の位相の変化とともに下流方向に移っているのが観察される。また、閉鎖場でも同様の傾向が見られている²⁾。よって、混成場・閉鎖場に関わらず明確な波立ちが観察されたケースでは風波の位相と水層の流速変動に相関が高いことが推察される。

4. おわりに

本研究では PIV 法を用いて風波・開水路混成場における風波による水層の瞬間構造の変化を時系列を追って考察したものである。その結果、風波・開水路混成場でも風波のみの流れ場で見られる風波の位相による瞬間構造の変化が確認できた。

(参考文献)

- 1) 橋津家久, 中山忠暢, 井上理恵: 風波発生下における水・空気界面での乱流・構造に関する研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.897-902, 1999.
- 2) 橋津家久, 吉田圭介, 池田大輔: PIV 法を用いた風波界面近傍流体の組織構造に関する基礎的研究, 水工学論文集, Vol.47, pp.457-462, 2003.