

京都大学大学院工学研究科フェロー 榎津家久
京都大学大学院工学研究科正会員 牛島省
京都大学大学院修士課程学生員 ○吉田圭介

1. はじめに

水／空気界面を通して行われる気体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。榎津ら¹⁾は、開水路流れおよび風波における気体輸送係数と界面乱流現象との関連性について考察を行った。さらに、榎津ら²⁾は水・空気層の相互作用による乱流現象や組織構造が気体輸送機構において重要な支配因子となることを示した。本研究では閉鎖水域における風波場を対象として PIV 法(Particle Image Velocimetry)によって閉鎖水域の風波界面の瞬間的な流体挙動を計測し、水層界面の位相平均化された乱流構造について考察する。

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。水層の瞬間的な流速はPIV システム(Dantec 社製)(図-1 参照)を用いて計測し、その際、超音波波高計(Keyence 社製)および Off-delay 器を用いて、明確な位相が存在する風波に対しては、風波の代表波(卓越周波数 f_p をもつ波)の位相を特定して計測を行った。また、風波の諸量計測には LDA¹⁾を用いた。表-1 に水理条件を示す。ここで、 h は水深、 $U_{a,max}$ は空気側の最大風速、 U_{*a} 、 U_{*w} はそれぞれ空気層・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、 λ と H はデジタルカメラにより測定された波の波長および波高である。最大風速をほぼ同一にし水深を変化させることで、水理条件を 3 ケースにした。座標系は流下方向へ位相を θ 軸 ($0 \leq \theta < 2\pi$, クレストを原点とする)、静水面より上向きを y 軸とした。PIV 計測断面は水路中央とし、位相平均手法²⁾により乱れ構造を抽出した。

3. 実験結果および考察

図-2 には、ケース w3 において画像解析された波形分布を、波高・卓越周波数・水深のデータから求められる微小振幅波と有限振幅波(ストークス波)の波形分布とともに波高 H_{exp} および波長 λ_{exp} (添字 exp は実験値)で規格化して示した。同図より、実験で得られた風波はストークス波が適用でき、波の峰は尖り、谷は平坦化することがわかる。すなわち、ここで対象とした風波は非線形性の強い波動であると言える。

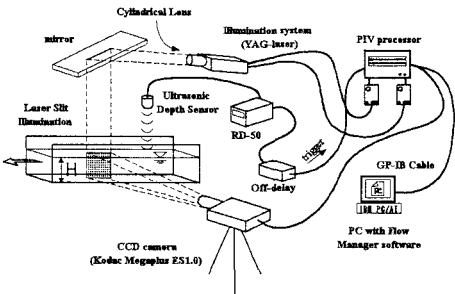


図-1 PIV 計測装置

表-1 水理条件表

Case	h (cm)	$U_{a,max}$ (cm/s)	U_{*a} (cm/s)	U_{*w} (cm/s)	L (cm)	H (cm)
w1	4	6.8	33.0	1.1	20.5	1.18
w2	12	6.67	40.4	1.32	17.2	1.24
w3	20	6.55	37.1	1.0	16.91	2.59

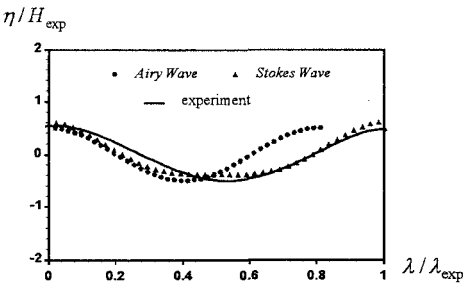


図-2 波形分布(Case:w3) (実験データ vs 理論値)

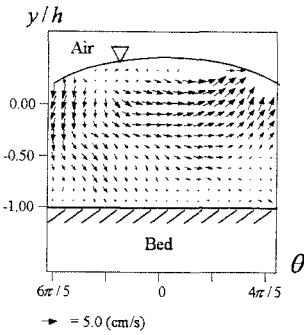


図-3 瞬間流速ベクトル(Case:w1)

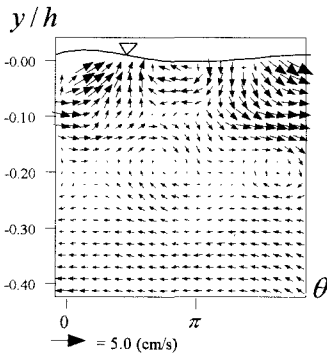


図-4 瞬間流速ベクトル(Case:w3)

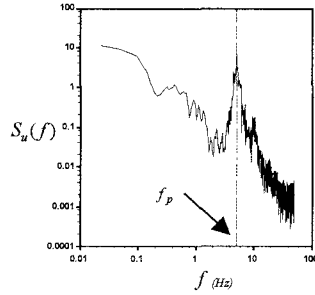


図-5 スペクトル密度関数 $S_u(f)$

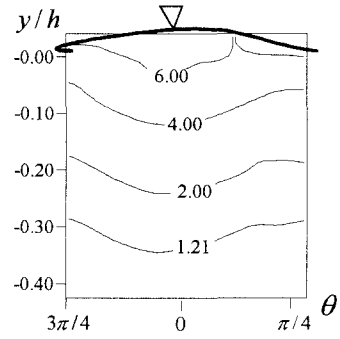


図-6 乱れ強度 u'/U_{*w} 分布

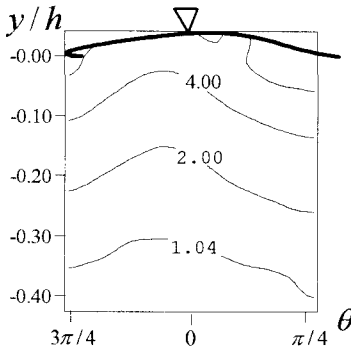


図-7 乱れ強度 v'/U_{*w} 分布

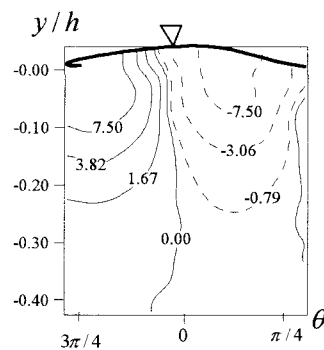


図-8 Reynolds 応力 $-\overline{uv'}/U_{*w}^2$ 分布

図-3、図-4には、ケースw1およびw3における水層のクレスト付近の瞬間流速ベクトル図を示した。両図より、クレスト風上側で高速下降流が、クレスト風下側で高速上昇流が観察され、両ケースともに界面において波動成分が観察される。ケースw1では、波動の影響が底面付近まで及び、水層の流体場は浅水波が支配的となっている。一方、ケースw3では半水深以下において明確な逆流が存在し、その影響による間欠的な渦が発生していることがわかる。そのため、水層の底面と界面では、流体の混合が盛んに行われていることが推察される。既往の風波研究においては、界面近傍での下方バースト(DBBL)³⁾が観察されるとの研究報告があるが、現在の研究で観察された渦との相関は明確ではなく、今後鋭意に検討する必要がある。

図-5には、LDAによって計測されたケースw3における界面近傍の主流速変動 $u(t)$ のスペクトル密度関数 $S_u(f)$ を示した。風波においては卓越周波数 f_p が存在し、この周波数を有する波動を風波の代表波（有義波）とする³⁾。図-6、図-7、図-8はケースw3において、上記代表波のクレスト付近の乱れ強度コンターおよびReynolds応力コンターである。同図より、界面付近に近づくにつれて乱れは増大している様子が観察される。また、開水路乱流場と異なり、界面近傍で鉛直方向乱れ強度 v'/U_{*w} は減少しないことがわかる。これは、界面における間欠的な空気流のせん断作用⁴⁾により、擾乱が供給されるためと思われる。一方、クレスト風上側では正のReynolds応力が、クレスト風下側で強い負のReynolds応力が観察され、クレスト付近では活発な運動量輸送が行われていることがわかる。この結果は、瀬津・中山⁵⁾の結果と一致する。また、間欠的に観察された組織的な渦は界面での高速流体（波動場起因）と底面での逆流によって形成されるため、位相平均されることでその効果が現れないことがわかる。空気層でのReynolds応力分布は粗面壁面乱流と相似であることが指摘されている。一方、水層での上記のようなReynolds応力の分布形を現象面で解釈することは容易ではないが、風波場における水層の乱流構造を今後は他のパラメータで規格化する必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では閉鎖水域場の風波の水層界面乱流構造に関して実験的な検討を行い、界面近傍における瞬間ベクトルおよび位相平均化された乱流構造を明らかにした。

(参考文献)

- 1) 瀬津家久, 中山忠暢, 井上理恵, 水工学論文集, Vol.43, pp.413-418, 1999.
- 2) 瀬津家久, 井上理恵, 吉田圭介, 応用力学論文集, Vol.3, pp.775-785, 2000.
- 3) Kawamura, H. and Toba, Y., *J. Fluid Mech.*, vol.197, pp.105-138, 1988.
- 4) Komori, S., Nagaosa, R. and Murakami, Y., *J. Fluid Mech.*, Vol.249, pp.161-183, 1993.
- 5) 瀬津家久, 中山忠暢, 水工学論文集, Vol.44, pp.897-902, 2000.