

京都大学
京都大学
京都大学

学生員
フェロー
正会員

○小松峻也
棚津家久
山上路生

1. はじめに

水面上に風が吹くと気液間の摩擦によって吹送流および「風波」が発生する。風波は気液界面での物質・運動量交換を促進し、水層部の構造に大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため、風波は海洋循環特性や地球温暖化、水性生態系への影響といった地球スケールの環境問題と密接するきわめて重要なテーマである。特に地球規模のスカラー循環過程においては、大気、海洋間の運動量・エネルギーの輸送現象や風波内部および界面付近の乱流構造の理解が不可欠な課題となっている。

そこで、今回はステレオ PIV 計測による室内計測を行い、風波流れの3次元構造、すなわちラングミュア循環流の形成特性を解明する、さらに水面変動を同時計測することで水面変動と流速成分の位相関係特性についても考察する。

2. 実験手法および水理条件

図-1 に実験装置を示す。使用した水路は全長 16m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型風洞水槽である。水流部は循環式で、インバータモータによって流量の自動制御が可能であるが、今回は循環パイプのバルブを全閉として、湖沼のような閉鎖性水域を再現した。また、水路上流部には大型ファンが取り付けられており、水流上に風を発生させることができる。本研究におけるステレオ PIV 計測には2台の高速度 CMOS カメラを用いた。水層部の風向きに対する横断面に出力 2 W の連続 YAG レーザーライトを厚さが 4mm になるようにシート状に照射し(以下 LLS と呼ぶ)、この2台のカメラで、LLS 上のトレーサー粒子(100 μ m 径のポリスチレン)を撮影した。2台のカメラ配置は角度オフセットを採用し、LLS から 1m 下流、水路外部よりカメラ間角度 90° になるように設置した。ステレオ PIV 計測は、パルスジェネレーターによって 100Hz のフレームレートで2画像を連続撮影させ、得られた画像ペアを 25Hz のサンプリングレートで制御 PC に記録した。100Hz のフレームレートなので、厚さ 4mm の LLS でも主流速をとらえることができる。この画像ペアから、LLS 上の流速3成分を求めた。また、LLS 面の流速3成分の計測と同時に別の高速度カメラを用いて水面変動を撮影し、水面形状を求めた。この評価については宮本ら(2001)¹⁾を参考にした方法を用いた。水面では画像の輝度差が急変しており、この輝度勾配を利用して水面位置を判定

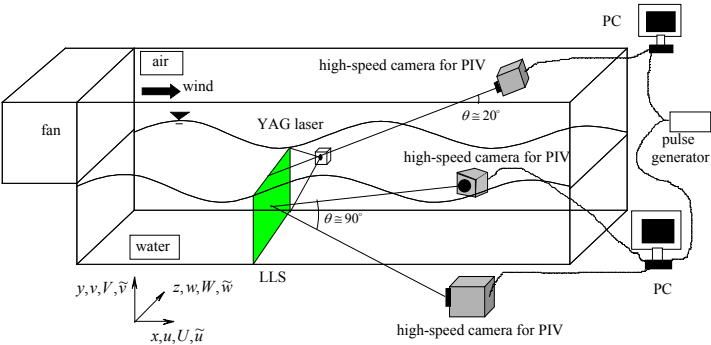


図-1 実験装置

表-1 水理条件

H (cm)	B/H	U_a (cm/s)	U_s (cm/s)	U_{*w} (cm/s)	H_s (cm)	f_p (Hz)	λ_w (cm)	T_a (°C)	T_w (°C)
20	2	10.0	34.5	1.57	4.57	1.76	24.07	24.5	25.7

した。水面画像の撮影は LLS から約 1m 下流、水路上方から約 20° の角度で見下ろして撮影した。図中の x, y, z はそれぞれ主流方向、鉛直方向、横断方向座標である。水路のセンターラインを $z = 0$ 、底面を $y = 0$ とする。 x は風向き、 y は鉛直上向きを、 z は主流方向に対して左岸方向をそれぞれ正とした。 U, V, W はそれぞれ x, y, z 方向における時間平均流速(cm/s)を表し、 $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ はそれらに対応する瞬間流速(cm/s)を表す。

表-1 は水理条件である。 H は水深、 B/H はアスペクト比(B は水路幅)、 U_a は風速、 U_s はストークスドリフト、 U_{*w} は水面摩擦速度、 H_s は有義波高、 f_p は周波数、 λ_w は波長、 T_a は気温、 T_w は水温を表す。

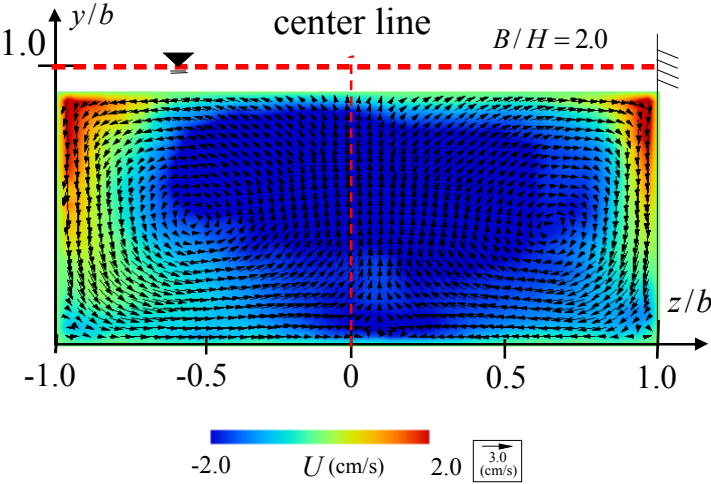


図-2 時間平均流速の横断分布 (コンターは主流速)

3. 実験結果および考察

図-2 は LLS 上の横断面における成分時間平均流構造を表している。縦軸が底面を $y = 0$ として鉛直方向にとり、横軸に水路中央を $z = 0$ として左岸方向にとり、それぞれ水路半幅 $b(= B/2)$ で無次元化している。流速は平均流横断ベクトル (V, W) とコンター U の 3 成分を表示している。この結果から、横断面には 1 対の 2 次循環流が発生しているのがわかる。また、主流方向に各位置によって違いがあり、水面付近にみられる発散領域では上昇流が発生していると同時に主流速が小さいのがわかる。一方、水面付近で収束流がみられる領域では下降流が発生していると同時に主流速が大きいのがわかる。

図-3 は横断面の水面付近の瞬間流速と水面変動の時系列分布であり、(a),(b),(c)の順に、瞬間主流速、瞬間鉛直流速、瞬間横断流速と水面変動の時系列分布を示している。まず、水面変動の時系列分布を見ると、位相的なずれは小さく、横断面全体で同位相の運動する。しかしながら、横断面で変動の大きさに差があることがわかる。これは、本装置の風波は不規則波のためである。これに対し、瞬間主流速の時系列分布を見ると、水面変動のピーク値と瞬間主流速のピーク値がほぼ同時に現れており、これらが同位相の関係にあることがわかる。水面変動の大きさに差があると既述したが、この変動値が他の位置と比べて大きいところほど、瞬間主流速が大きいことがわかる。次に、瞬間鉛直流速と水面変動の時系列分布を比較すると、水面変動のピーク値よりも瞬間鉛直流速のピーク値のほうがはやく現れることがわかった。このタイムラグは約 1/4 周期であった。また、鉛直流速も横断面によって差があるが、これが水面変動の大きさの差に対応しているのがわかる。このことから、瞬間主流速、瞬間鉛直流速は縦断面の流れに大きく影響しているといえる。

一方、瞬間横断流速の時系列分布を見ると、横断面で水面変動に差があるが、これに対応するように横断方向に流れが発生しているのがわかる。つまり、横断方向から流れが集まることで水面が高くなる特性がみられる。これより、瞬間横断流速は横断面の流れの不規則性に大きく影響しているのがわかる。

図-4 は横断面の水路中央の水面変動 η と瞬間流速 3 成分の時空間相関値であり、

$$C_{u_i\eta}(\tau) = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik}(t+\tau) - \bar{u}_i)(\eta_k(t) - \bar{\eta})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{ik} - \bar{u}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (\eta_k - \bar{\eta})^2}} \quad u_i = u, v, w \quad (1)$$

で求められる。 τ は遅れ時間を表す。この図から瞬間主流速との相関は $\tau = 0$ で相関値が高く、瞬間鉛直流速は $\tau = -T/4$ で相関値が高いのがわかる。また、瞬間横断流速は全体的に相関値が小さく、横断方向の流れが不規則性があるのがわかる。

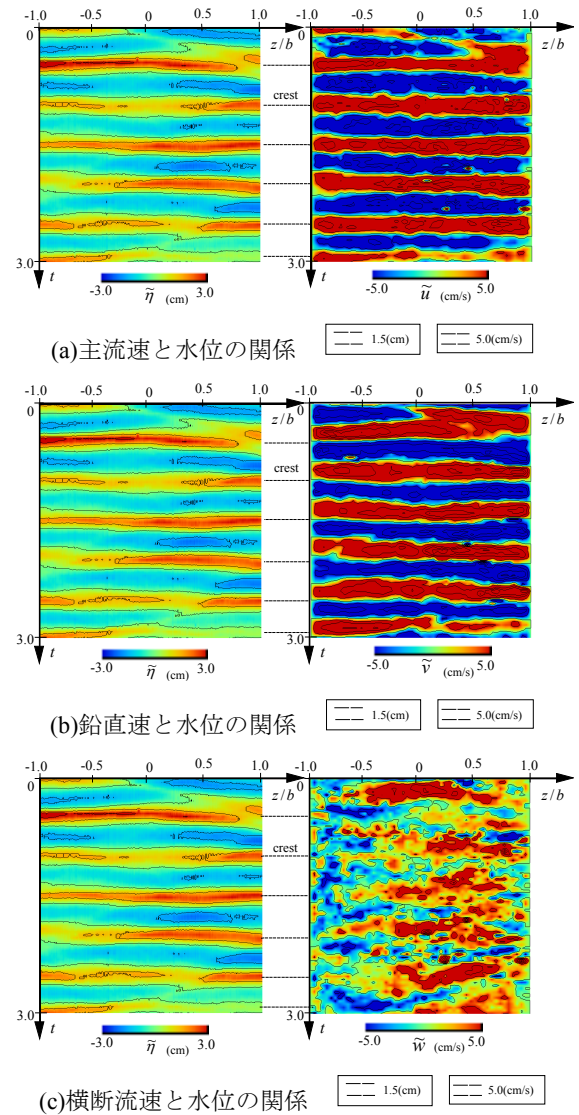


図-3 横断面の水面付近の瞬間流速と水面変動の時系列分布

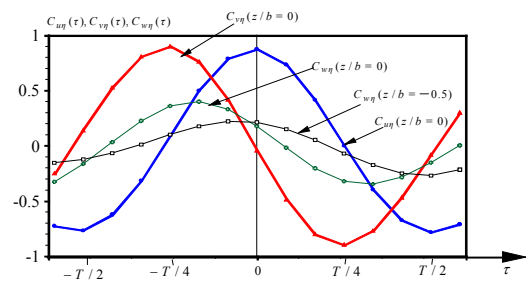


図-4 時空間相関係数

4. おわりに

今回はステレオPIV計測を用いた 3 次元構造の把握と水面画像計測を用いた水面形状計測を同時に行い、流速と水面の可視化を行ったが、まだまだ未解明の部分が多い。循環流の形成とそれをもたらす風波の性質について今後も研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 宮本仁志, 神田徹, 大江和正: 画像解析による水面変動・流速の同時計測法と開水路凹部流れへの適用, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.511-516, 2001.