

風波水域における乱れと水面変動の相関構造に関する研究

京都大学 学生員 ○戸田瑛大  
 京都大学 フェロー 禰津家久  
 京都大学 正会員 山上路生

1. はじめに

近年、地球規模のスカラー循環過程において、大気・海洋間の運動量・エネルギーの輸送現象を理解することが不可欠な課題となっている。水・空気界面における輸送現象については水層の乱流現象が支配的であることが指摘されており、様々な計測と解析が行われている。最近では、水流と気流の同時解析システムが開発されつつあるが<sup>1), 2)</sup>、乱流構造や波と流れの相互作用については未解明な部分が多い。そこで本研究では2台の高速カメラを用いた「流速・水面変動の同時計測システム」を構築するとともに、水面変動と流れの関係性および組織構造の特性を明らかにした。

2. 実験手法および水理条件

計測に用いた水路は全長 16m, 幅 40cm, 高さ 50cm の総ガラス製の可変勾配型水路風洞である(図-1)。本実験では水流部はタンク状態(閉鎖性水域)を再現し、水路上流側の大型ファンにより水流上に風を吹かせた。本実験では水深  $H$  を 4, 8, 12, 20cm の4種類に変化させ、各ケースで2次元重力波を発生させた。 $x, y$  はそれぞれ主流方向および鉛直方向を示す。表-1 に水理条件を示す。計測区間は、風波が十分発達したと考えられる水路上流端から約 7m 下流の地点に設定した。また水路下流端には消波板を設置し、反射波の影響をなくした。

計測には2台の高速 CMOS カメラ(Ditect 製)を用いた。1台は PIV 計測としてレーザーシート光上のトレーサー粒子(100 $\mu$ m 径のポリスチレン)を、もう1台は水面形状を撮影した。これらのカメラをパルスジェネレーターで同期制御し、同時撮影した。図-2 は、本システムで得られた原画像とそれに対応する輝度分布の一例である。タンク水にローダミンBを溶解させることで、気液界面をできるだけ鮮明に可視化できるように工夫した。また、カメラ側の水面変動によって計測部の水面が遮断されることを防ぐため、水面計測用のカメラは水平面から下方に約 10 度傾けた。気液界面では輝度が急変しており、判別しやすい画像が得られていることが図-2 からわかる。この輝度分布から、宮本ら(2001)<sup>3)</sup>の方法に従って水面の時間空間分布を計算した。

3. 実験結果と考察

計測画面中央( $x/L_x = 0$ )に基準検査面をとり、その検査面における水面変動 $\eta$ と空間位置における流速変

表-1 水理条件

Case	$H$ (cm)	$U_{a,max}$ (m/s)	$U_s$ (cm/s)	$U_w$ (m/s)
C04c	4	6.80	28.10	0.0169
C08c	8	7.19	20.10	0.0115
C12c	12	6.63	22.56	0.0138
C20c	20	7.02	37.50	0.0230

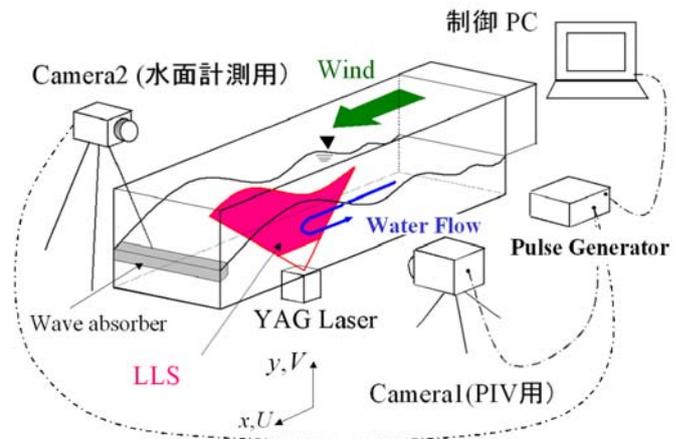


図-1 計測システムと座標系

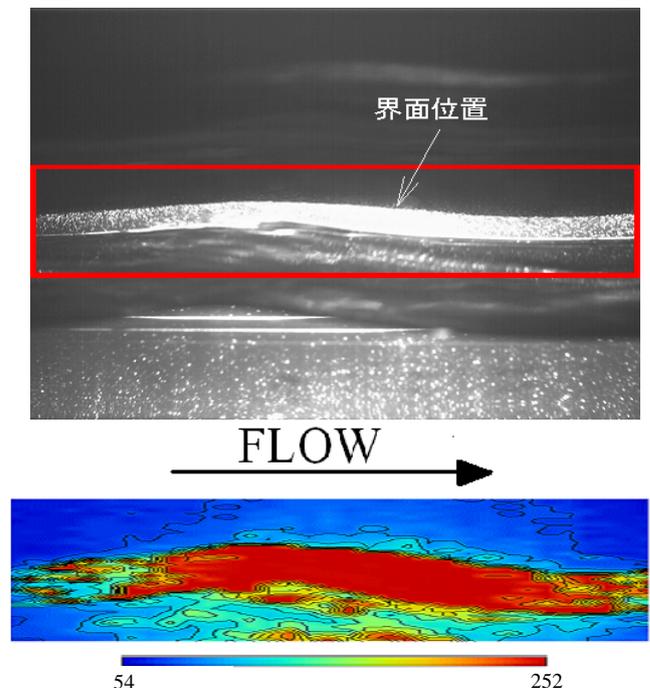


図-2 原画像と $\eta$ の輝度分布 (上; 原画像, 下; 輝度分布)

動の相関係数を次式より求めた。

$$C_{\eta u}(x, y) = \frac{(\hat{\eta}(x_0, t) - \bar{\eta}(x_0))(\hat{u}(x, y, t) - \bar{u}(x, y))}{\eta'(x_0) \times u'(x, y)} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{\phantom{x}}$ は瞬間値、 $\bar{\phantom{x}}$ は時間平均を表す。 $u'$ および $\eta'$ はそれぞれ $u, \eta$ の乱れ強度(rms 値)である。 $\eta$ と $v$ の相関も同様に求めた。かぶり領域( $y/H > 1$ )の計算に際して、水面変動 $\hat{\eta}$ については全時間をサンプリングしているが、瞬間流速 $\hat{u}, \hat{v}$ は計測位置に水流が存在するときのみデータをサンプリングし、それらの集合平均を行った。

図-3はC04についての結果である。図より $C_{\eta u}$ は基準位置 $x/L_x = 0$ で最大値をとり、 $x/L_x = \pm 1$ の面で最小値となる。水・空気界面に近いほど、わずかではあるが増加傾向を持ち、かぶり領域( $y/H > 1$ )ではきわめて大きい。このことから、主流速と水面変動は同じ位相をもって時間変化することがわかる。一方、 $C_{\eta v}$ は $x/L_x = 0.25$ で正の相関が最大となり、 $x/L_x = -0.25$ で最小となる。この相関も界面近傍に近いほど相関が増加するが、かぶり領域では減少傾向になる。

以上をまとめると、 $u$ と $\eta$ は強い正の相関、 $v$ と $\eta$ は強い負の相関があるといえる。

次に、組織構造を定量評価するファクターとして、次式で与えられる瞬間渦度を考える。

$$\hat{\omega} \equiv \frac{\partial \hat{u}}{\partial y} - \frac{\partial \hat{v}}{\partial x} \quad (2)$$

図-4は、C04のケースに関して計測領域全体における渦度の瞬間値 $\hat{\omega}$ と、水面変動 $\hat{\eta}$ を同時にプロットしたものである。まず $t = 0(s)$ では、波のクレストに強い正の渦度塊AとB(図中に記入)が見られる。時間とともにクレストは流下方向に輸送されるが、この動きに渦度塊Aも追従している。一方で、渦度塊Bはほぼ定位置に留まっている。このことは、A部はストークスドリフトによって流下輸送されるのに対し、B部は図-3と関連する波の運動に追従して移流されないことがわかる。このように風波の発生下では、少なくとも2種類の組織渦構造が存在するものと考えられる。今後、これらの発生メカニズムの詳細を明らかにしたい。

#### 4. おわりに

本実験では、高速度カメラ2台を用いてPIVおよび輝度計測による「流速・水面変動同時計測システム」を開発し、風波現象における界面近傍における流れと波の相関特性および組織渦の挙動を観察した。

##### 参考文献

- 1) 竹原幸生, 真木正弘, 辻本剛三, 江藤剛治, 高野保英: 風波

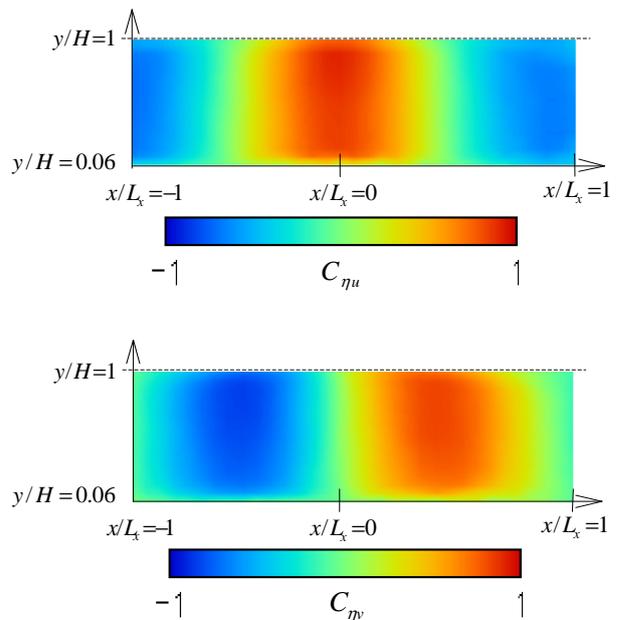


図-3 水面変動と瞬間流速の相関構造

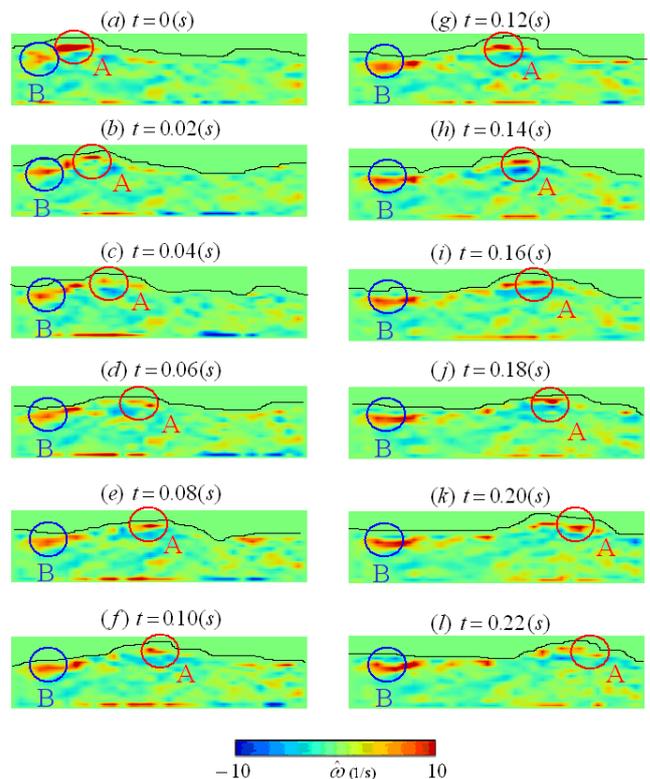


図-4 瞬間渦度の空間分布の時間変化

発生時における水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.60-70,2002.

- 2) 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.
- 3) 宮本仁志: 開水路乱流における水面変動の移流特性, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.649-654, 2006.