

流速と水面の同時画像計測による開水路流れの解析

神戸大学工学部 宮本 仁志・神田 徹
 神戸大学大学院 下山 顕治

1. まえがき

開水路流れの乱流構造に及ぼす自由水表面の影響は、水表面を介しての気体輸送や運動量交換に関係するため、河川の自浄作用など水環境の観点からも重要と考えられる。本報では、これまでに筆者らが開発してきた水面・流速の同時画像計測法^{1),2)}を用いて、開水路での瞬時の水面分布と流速ベクトルを測定し、得られた水面の計測値に主成分分析³⁾を施すことにより開水路流れにおける自由水表面の変動特性を調べる。さらに、それら水面変動の主成分と内部の流速変動との相関解析により、自由水表面の変動と開水路乱流との相互関係を検討する。

2. 同時画像計測法と実験の概要

図-1 に計測システムの概要を示す。流水中に比重が約 1.02、粒径 0.075 ~ 0.150mm の高分子ポリマー粒子を投入し、計測対象断面をレーザースリット光で可視化する。鏡を用いることにより可視化断面での流体内部と水面形状を同一画像フレーム内で撮影し¹⁾ PIV と水面形状の抽出アルゴリズム²⁾により流速ベクトルと水面分布をそれぞれ測定する。実験水路は長さ 10m、幅 0.25m のアクリル製直線水路であり、計測断面は水路中央の鉛直断面である。表-1 に水理条件を示す。実験では、レイノルズ数 $Re = UH/\nu$ を 2.0×10^4 で一定にし、 $Fr = U/(gH)^{1/2}$ を 0.81 ~ 2.33 と変化させている。画像のサンプリング周波数は Case1 で 400Hz、その他の Case で 240Hz であり、一画素の実長は 0.18 ~ 0.36mm である。

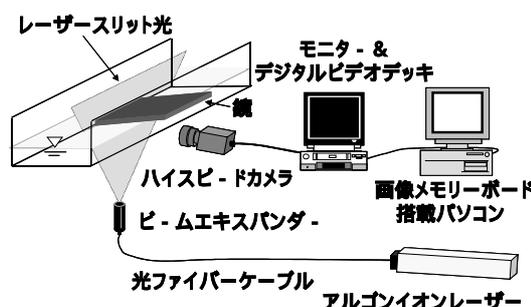


図-1 計測システムの概要

表-1 水理条件

Case	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$H(\text{cm})$	$U(\text{cm/s})$	$U_w(\text{cm/s})$	S	Fr	Re
1	5.0×10^3	2.0	102.1	5.17	1/65	2.33	2×10^4
2		2.5	79.3	4.20	1/134	1.60	
3		3.0	67.1	3.51	1/215	1.24	
4		3.5	56.5	3.01	1/347	0.96	
5		4.0	50.4	2.75	1/476	0.81	

Q :流量, H :平均水深, U :平均流速, U_w :底面摩擦速度, S :水路床勾配, Fr :フルード数, Re :レイノルズ数.

3. 計測結果とその考察

図-2 に瞬時の水面と流速分布の例(Case2)を示す。水路床近傍の流速は、壁面せん断によって上下に変動している。水面はほぼ水平であるが、波長が 3 ~ 4cm の微小な凹凸が存在している。

図-3 は Case2 における水面分布の経時変化であり、1/80sec 毎の水面形状が重ねて表示されている。瞬時の水面は、平均水深 H に対して約 $\pm 0.1\text{cm}$ の幅もち、流下方向に変動している。時間の経過とともに、

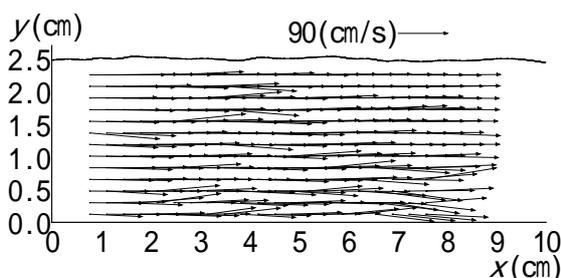


図-2 瞬時の水面と流速の空間分布 (Case2)

水面分布は若干変形されながら下流側に移動しているのがわかる。さらに、 $t = 3.246, 3.258$ secにおいて上流側で波頂が新たに現れており、水面が波動的に変動していることが推察される。

図-4に平均流速 U^+ の鉛直分布を示す。 U^+ は図に併示した対数則分布とよく一致しており、水面近傍では wake 領域が存在している。

水面変動強度 $\sqrt{h'^2}/H$ とフルード数 Fr の関係を図-5に示す。本画像計測での $\sqrt{h'^2}/H$ (印) は、 Fr に伴って増加しており、中瀬ら⁴⁾の実験値と同一オーダーで同様の傾向を示す。しかし、禰津ら⁵⁾により指摘された限界流付近における $\sqrt{h'^2}/H$ の急増は、本計測では得られていない。中瀬ら⁴⁾の計測値でも限界流付近で急増現象を示さないケースもあり、水面の変動特性については流体内部の乱流構造と水面変動の相互関係を考慮した現象の整理が必要と思われる。

4. 主成分分析による水面変動の特性抽出

水面変動は様々な時空間スケールの乱流成分と関連すると考えられるため、水面変動成分 $h'(x,t)$ と流速変動成分 ($u'(x,y,t), v'(x,y,t)$) の相関解析を行う前に $h'(x,t)$ の主成分分析を行い、 $h'(x,t)$ をモード分解することによって水面変動の主要パターンを抽出した。

図-6にCase2 ($Fr = 1.60$)での水面変動の固有ベクトル \mathbf{m} を示す。各図の右側にはモード m の累積寄与率 C_m を併記しており、 $m=7$ までで全変動エネルギーの約 90% が再現されることがわかる。 $m=1$ の固有ベクトル \mathbf{m}_1 は流下方向にほぼ一定の値をとる。一方、 $m=2$ から高次モードの \mathbf{m}_m により示される主要な水面変動パターンは正弦波形に近似しており、モード次数 m とともにその波数が増加している。この正弦波形の分布 \mathbf{m}_m はさらに高次モードでも続いて現れており、全変動エネルギーに対するこれら正弦波形状の \mathbf{m}_m の割合は約 56% であった。このことは、流れ場全体で一様に変動する $m=1$ の固有モード(寄与率 0.42)を除き、水面変動の空間分布がこれら正弦波の重ね合わせによってほぼ再現されることを示している。なお、他のCaseにおいても、得られる固有ベクトルの分布傾向はCase2と同じであった。

次に、正弦波形状の分布を示している $m=2$ より高次モードの固有ベクトル \mathbf{m}_m について、その波長 L_m を算出した。図-7に各モード m での無次元波長 L_m/H と寄与率 c_m の関係を示す($m = 2 \sim 11$)。 L_m/H と c_m との間には強い正の相関があり、変動エネルギーの大きい \mathbf{m}_m は波長が大きいことがわかる。ま

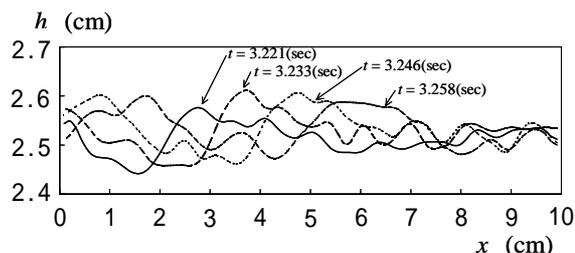


図-3 水面分布の経時変化 (Case2)

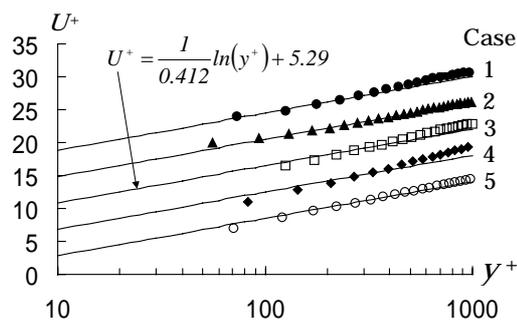


図-4 平均流速 U^+ の鉛直分布(対数則との比較のため Case ごとに縦軸を調整)

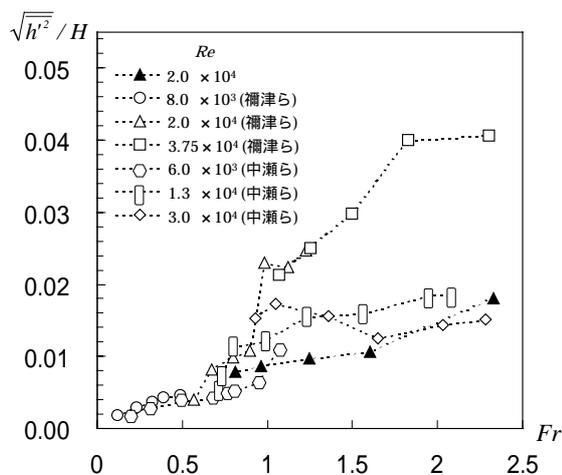


図-5 水面変動強度とフルード数の関係

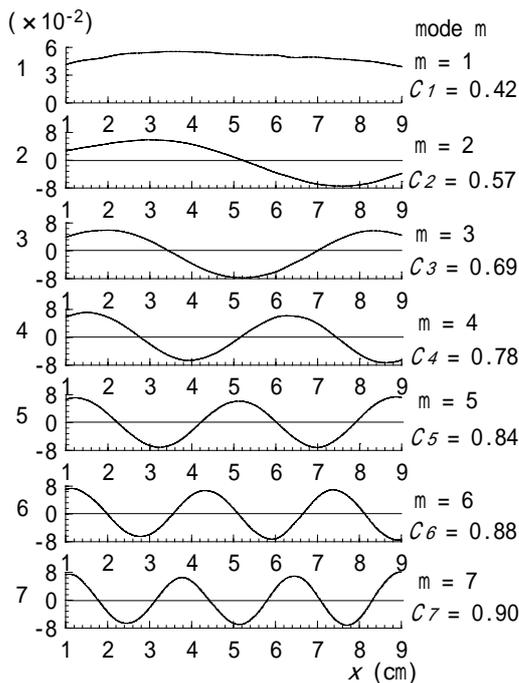


図-6 水面変動の固有ベクトル ϕ_m (Case2)

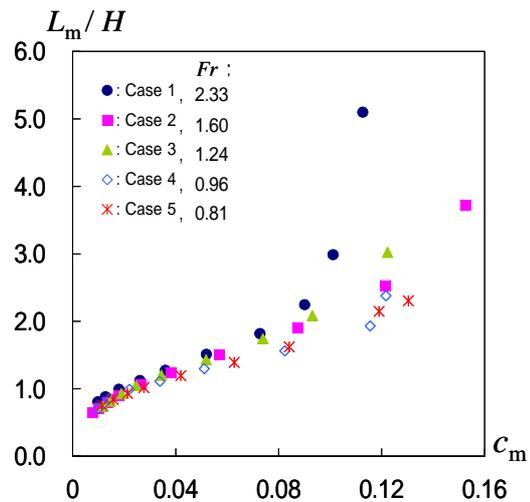


図-7 各モードの波長と寄与率の関係

た、特に、 c_m が 0.1 程度以下においては L_m/H と c_m の間の関係に Fr の依存性が認められない。このことは、正弦波形を示す水面変動の主成分 ϕ_m のほとんどは、 Fr に関係なく、全変動エネルギーに対して同じ割合で同一無次元波長 L_m/H の成分を含むことを示している。

図-8 に Case2 のモード $m=1 \sim 7$ における主成分の振幅(時系列) a_m のパワースペクトルを示す(ここでは、各モード間の卓越周波数の変化を見ることを目的とするため、図の縦軸を調整した)。 a_m の卓越周波数はモードの次数 m が大きくなるにしたがって高周波側へ移っている。以上より、波数が大きい主成分ほど高周波数の微小な変動になることがわかる。

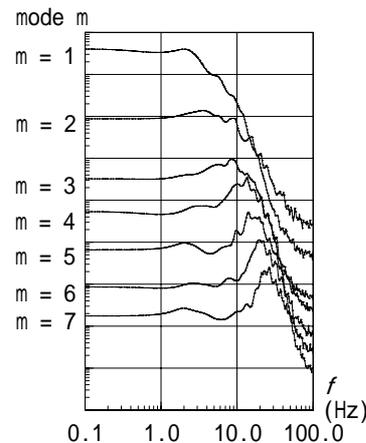


図-8 モード $m=1 \sim 7$ における振幅 a_m のパワースペクトル(Case2)

5. 水面変動の主成分と流速変動の空間相関解析

得られた各モード m の主成分 ϕ_m と流速変動(u', v')との相互関係を、相関解析により検討した。図-9 はモード $m=1, 4, 7$ における振幅 a_m と(u', v')との同時空間相関(C_{uam}, C_{vam})である。図-9(a-1)(C_{ua1} , モード $m=1$)において、相対的に相関の高い領域は、 $y/H > 0.7$ において流下方向にある程度の広範囲で分布している。図-9(b-2)(C_{va4} , $m=4$)では平均水深 H と同程度の空間スケールをもつ正負の相関が流下方向に連なっており、さらに、図-9(c-2)(C_{va7} , $m=7$)においては、 $m=4$ で見られた正負の相関の空間スケールが小さくなる。これより、モード $m=1$ の主成分 ϕ_1 は水面近傍での主流の変動に起因していると考えられる。また、モード次数 m が大きくなるにしたがい、対応する ϕ_m は、全水深規模の渦からより小さいスケールの渦運動に起因する変動パターンを表すようになると推察される。

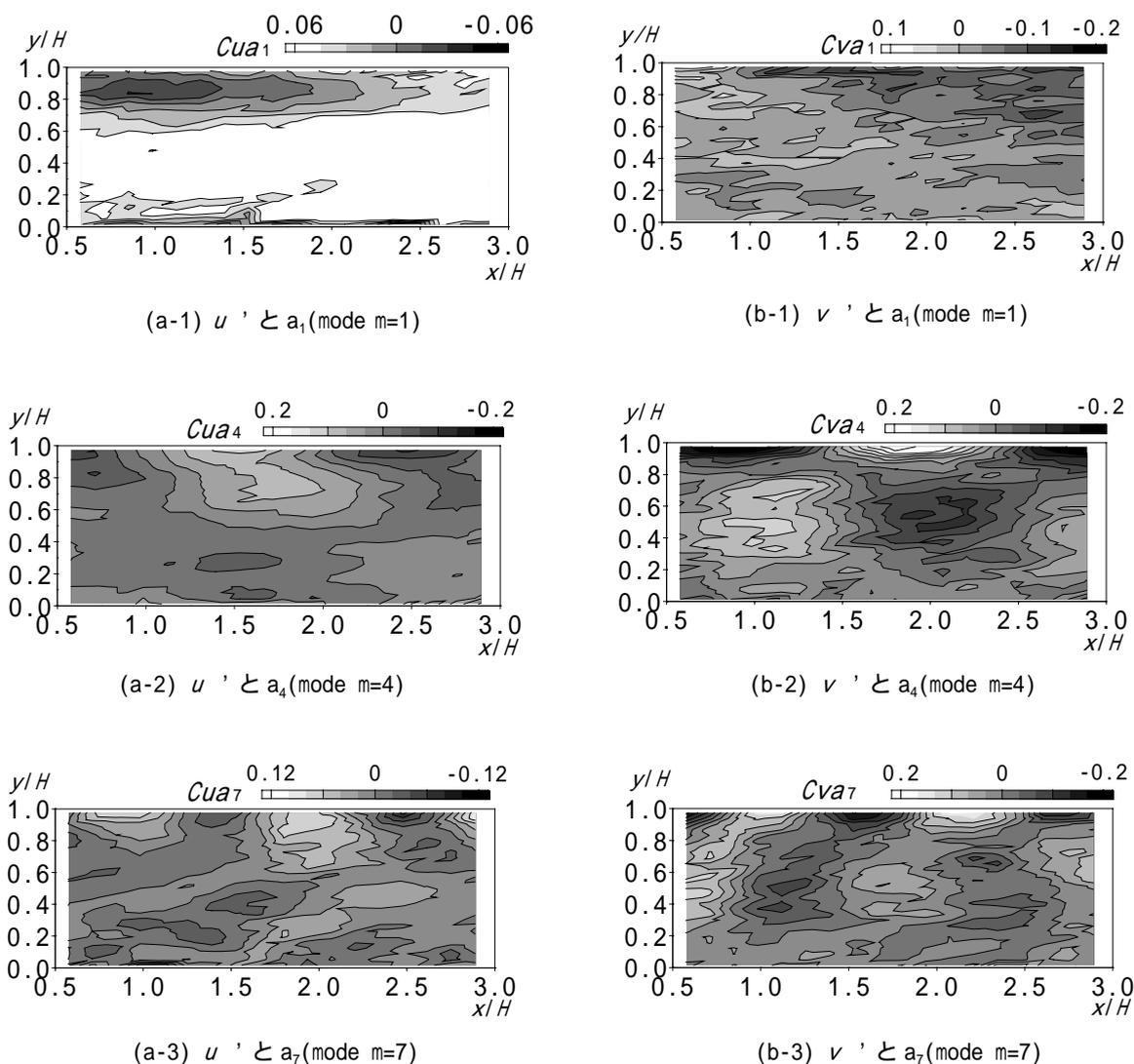


図-9 水面変動の各モードの振幅 a_m と流速変動 u' , v' の相関分布

6. あとがき

本報では、水面・流速の同時画像計測法を用いて開水路での瞬時の水面分布と流速ベクトルを測定し、水面と流速の時空間変動特性について検討を行った。主成分分析を用いることによって水面分布の主要変動パターンを検出した結果、得られた主成分のほとんどは正弦波で近似され、各モードの無次元波長と寄与率の間にはフルード数に依存しない強い正の相関があることがわかった。また、得られた水面の主成分と流速の変動成分との相関解析より、正弦波形をもつ水面変動の主成分と内部の渦運動とは連動していることが示唆された。

謝辞：本研究の実験・データ整理に関して、(株)リクルート(当時、神戸大学学生) 稲岡克彦氏に助力いただいた。記して謝意を表す。

<参考文献> 1)下山, 神田, 宮本, 大江: 第56回土木学会年次学術講演会講演概要, -159, pp.318-319, 2001.
 2)宮本, 神田, 大江: 水工学論文集, 第45巻, pp.511-516, 2001. 3)宮本, 神田, 兵頭: 水工学論文集, 第45巻, pp.505-510, 2001. 4)中瀬, 横嶋, 中山, 藤田: 日本流体力学会年会2000講演論文集, pp.243-244, 2000.
 5)禰津, 中山: 土木学会論文集, No.593/ -43, pp.69-78, 1998.