

開水路流れにおける自由水表面の空間変動特性

神戸大学工学部 正会員 ○宮本 仁志
 神戸大学大学院 学生員 下山 顕治
 神戸大学工学部 フェロー 神田 徹
 (株)リクルート 稲岡 克彦

1. はしがき

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などに関係するため、河川の自浄作用など水環境の観点から重要と考えられる。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について検討を行う。

2. 実験概要および水理条件

計測システムの概要を図-1に示す。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により流速ベクトルと水面分布をそれぞれ測定する²⁾。実験水路は長さ10m、幅0.25mの亚克力製直線水路であり、計測断面は水路中央の鉛直断面である。水理条件を表-1に示す。実験では、レイノルズ数 $Re = UH/\nu$ を 2.0×10^4 で一定にし、フルード数 $Fr = U/(gH)^{1/2}$ 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。

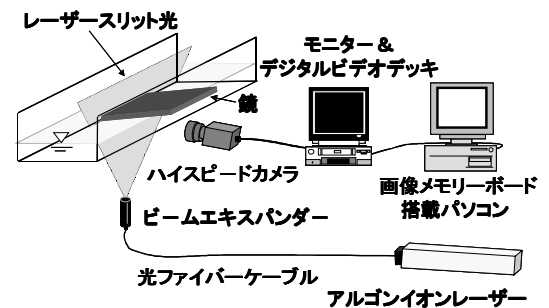


図-1 計測システムの概要

表-1 水理条件

Case	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$H(\text{cm})$	$U(\text{cm/s})$	$U_\tau(\text{cm/s})$	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_τ :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. 画像計測結果および考察

図-2に瞬時の水面分布と流速ベクトルの例(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 $\pm 0.1\text{cm}$ の幅で流下方向に変動している。時間の経過とともに、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、 $t = 3.246, 3.258\text{sec}$ においては上流側で新たな波頂が現れており、水面が波動的に変動していることが推察される。

図-4に水面変動強度 $\sqrt{h'^2}/H$ とフルード数 Fr の関係を示す。本画像計測での $\sqrt{h'^2}/H$ (シンボル:▲)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

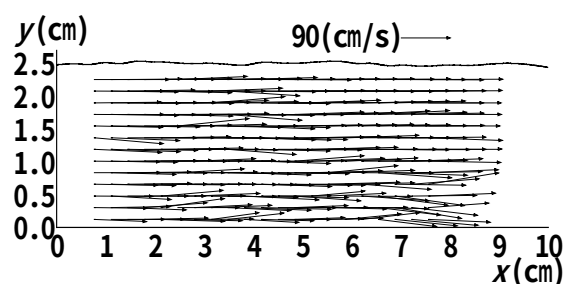


図-2 瞬時の水面と流速の空間分布 (Case2)

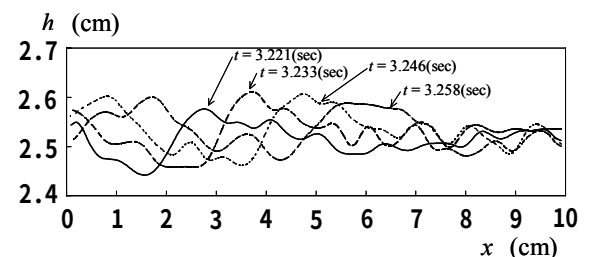


図-3 水面分布の経時変化 (Case2)

キーワード 開水路, 水面変動, 乱流, 画像計測, 主成分分析

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

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、**図-3**に示すような空間的な水面変動の情報を含めた検討が必要と考えられる。

4. 主成分分析による水面の空間変動特性の抽出

そこで、水面変動 $h'(x,t)$ に主成分分析³⁾を施し、 $h'(x,t)$ 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検出した。

図-5にCase2での水面変動の固有ベクトル ϕ_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%が再現されている。 $m=1$ の固有ベクトル ϕ_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 ϕ_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。この正弦波形状の分布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 ϕ_m の割合は約56%であった。このことは、 $m=1$ の流れ場全体で変動する固有モード(寄与率 $c_1 = 0.42$)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 ϕ_m について、その波長 L_m を算出した。**図-6**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 の間には強い正の相関があり、変動エネルギーの大きい ϕ_m は波長が大きいことがわかる。また、特に、 c_m が0.1程度以下においては、 L_m/H と c_m 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 のほとんどが、 Fr に依存せず、全変動エネルギーに対して同じ割合 c_m で同一無次元波長 L_m/H をもつ成分となることを示している。

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, II-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/II-43, pp.69-78, 1998.

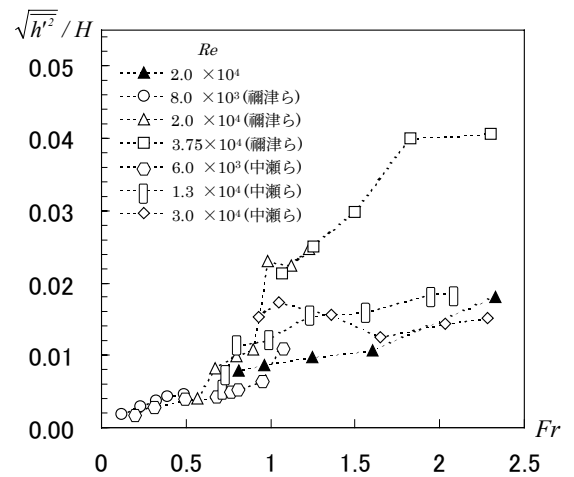


図-4 水面変動強度とフルード数の関係

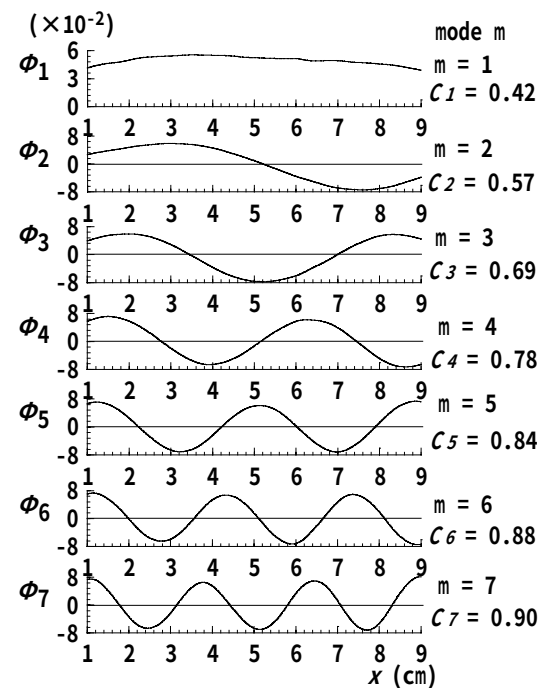


図-5 水面変動の固有ベクトル ϕ_m (Case2)

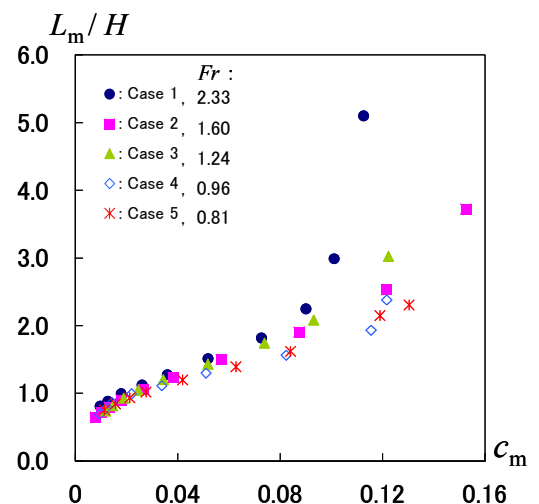


図-6 各モードの波長と寄与率の関係