

神戸大学大学院 学生員 ○下山 顕治
神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
神戸大学工学部 学生員 畑 洋輔

1. はしがき

自由水面近傍における乱流構造は、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重要となる。筆者らは、これまで、水面・流速の同時画像計測法により開水路での瞬時の水面分布と流速ベクトルを測定し、水面変動と開水路乱流との空間相関構造について調べてきた¹⁾。本文では、水表面近傍の乱流構造に及ぼす水面変動の影響範囲について検討を行ったので報告する。

2. 水理実験と同時画像計測の概要

表-1に水理条件を示す。実験水路は全長10m、幅0.25mの亚克力製であり、同時画像計測の測定断面は水路中央の流下方向鉛直断面である。実験では、レイノルズ数 Re を 1.0×10^4 と一定にし、フルード数 Fr を 0.53~1.23 と常流から射流まで変化させた。

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、粒径約0.02mmの高分子ポリマー粒子を投入し、ダブルパルスYAGレーザーによるスリット光で計測断面を可視化する。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内で撮影し、水面・流速の同時計測手法により流速ベクトルと水面分布を算出する。得られる流速ベクトルのサンプリング周波数は15Hzであり、一画素の実長は約0.01cmである。

3. 結果と考察

(1) 水面分布の空間変動特性：

時々刻々の水面分布の測定値を用いて水面変動成分 $h'(x, t)$ のPOD解析を行い、水面変動の主要パターンを抽出した¹⁾。図-2に、Case 4における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、 $m=10$ までで全変動強度の約90%が再現される。 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。この正弦波形の分布はさらに高次のモードでも続いており、水面変動の空間分布は、その大部分を正弦波の重ね合わせによって再現できることがわかる。ただし、 $m=1$ において ϕ_m はほぼ様な分布形状となっており、 $Fr>1.0$ では計測断面全体で上下変動する成分が卓越するようになる。

(2) 水面変動主成分と流速変動成分の相関構造：

得られた各モード m の水面変動主成分 ϕ_m の振幅 a_m を用いて、 a_m と流速変動成分 (u', v') の空間相関係数 $COR_{h'mu'}$ 、 $COR_{h'mv'}$ を算出した。その結果、水面変動と流速変動は流下方向に同一の空間スケールをもつことがわかった¹⁾ので、ここでは両者の相関構造をより明確にするために、 ϕ_m の分布に関して $COR_{h'mu'}$ 、 $COR_{h'mv'}$

表-1 水理条件

Case	Q (cm^3/s)	H (cm)	U (cm/s)	U_τ (cm/s)	$1/I$	Re	Re_τ	Fr
1	2.5	3.29	30.4	1.53	1149	1.0	502	0.53
2		2.91	34.3	1.78	747		518	0.64
3	10^3	2.42	41.3	2.14	447	10^4	517	0.85
4		1.89	52.8	2.67	237		505	1.23

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

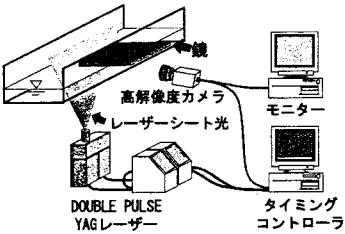


図-1 計測システムの概要

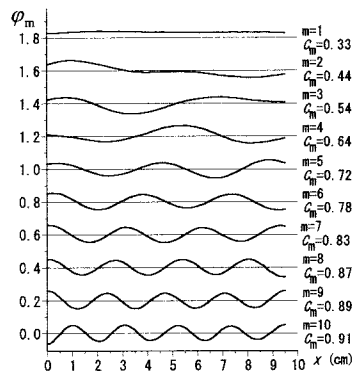


図-2 水面変動の固有ベクトル ϕ_m (Case4)
(縦軸を0.2ずつ移動させており、各モード m の横軸が実際には原点を通る)

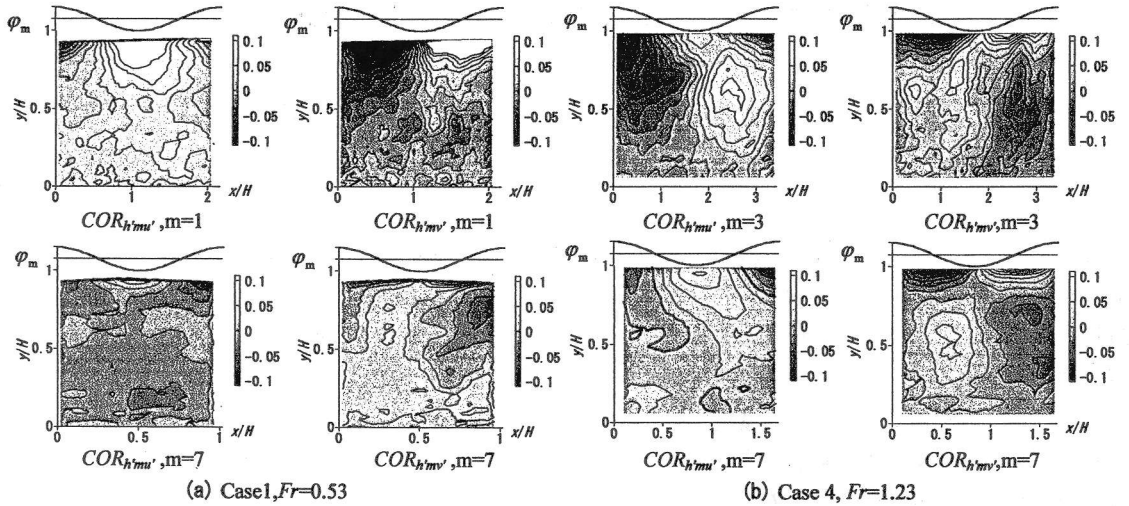


図-3 φ_m の位相に対する $COR_{h'mu'}$, $COR_{h'mv'}$ の分布(図の上方に固有ベクトル φ_m の形状を併示)

の位相平均を算出した。図-3にその結果を示す。 $COR_{h'mu'}$, $COR_{h'mv'}$ の流下方向分布は、水表面近くにおいて、それぞれ φ_m の波長 L_m に拘わらずほぼ同一の相関構造となることがわかる。すなわち、 $COR_{h'mu'}$ の分布形状は φ_m の波底で正、波頂で負の相関となり、 $COR_{h'mv'}$ は波頂→波底の中央で負、波底→波頂の中央で正の相関となる。このことより、水面近傍では、水面の形状に沿った流れとなることが推察される。一方、 $y/H=0.8$ 程度以下の流れの中央での $COR_{h'mv'}$ においては、波頂→波底で正、波底→波頂で負の相関が見られる。以上のことより、水面から鉛直下方をみた場合の内部の乱流構造は、水面近傍で厚さ $\delta=0.2H$ 程度の水面変動の影響が顕著な層(水面影響層)と、流れ中央の大規模な乱流構造の層とに分けることができる。

(3) 水面影響層の鉛直スケールの評価：

次に、水面影響層の層厚が水面変動の流下方向スケールや Fr 数によってどのように変化するかを調べるために、水面影響層の鉛直方向スケール δ_m を次式により定義した。

$$\delta_m = \frac{1}{C_{\max}} \sum_{y=y_h}^{y_0} C_y \Delta y \quad (1)$$

ここに、 C_y ： φ_m の位相が $\pi/2$, $3/2\pi$ での $COR_{h'mv'}$ の鉛直分布の平均値 ($\pi/2$ では、 C_y の符号が逆になるため、-1 をかける)、 $C_{\max}$ ： C_y の最大値、 y_h ：水面直下の y 座標、 y_0 ： C_y の符号が入れ替わるときの y の値、 Δy ：計測間隔である。

図-4に、無次元鉛直方向層厚スケール δ_m/H と無次元波長 L_m/H の関係を示す。 L_m/H が増加するに伴って δ_m/H の値は大きくなっており、波長の大きい水面変動成分ほど内部流速変動に対して影響を及ぼす範囲が大きいことがわかる。また、低い Fr 数においては L_m/H にともなう δ_m/H の増加率が相対的に大きいのにに対して高い Fr 数ではその増加率は小さくなっており、同一の L_m/H における δ_m/H の値についても高 Fr 数の場合ほど小さくなっている。これは、 Fr 数が大きくなるに伴って、水面の重力復元力に対する底面せん断起源の流体内部の乱れが相対的に大きくなり、水面変動に伴う乱れの範囲が抑制されるためと推察される。

<参考文献>1) 宮本, 下山: 水工学論文集, 第47巻, pp.439-444, 2003.

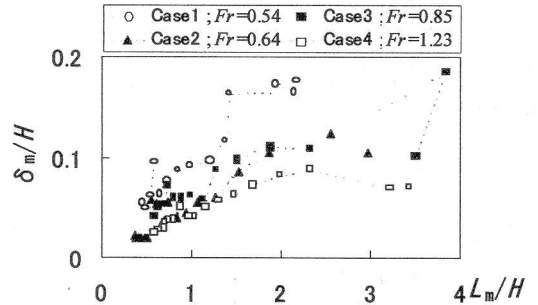


図-4 無次元層厚スケール δ_m/H と無次元波長 L_m/H の関係