

開水路乱流における水面変動の影響範囲

(株)ニュージェック 正会員 下山 顕治
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
 神戸大学大学院 学生員 畑 洋輔

1. はじめに

筆者らは、これまで、水面・流速の同時画像計測法を用いることによっ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⁾。本報では、得られた同時計測の測定値を用いて、自由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. 同時画像計測と水理条件

図-1 に計測システムの概要を示す。流水中に粒径約 0.02mm のトレーサー粒子を投入し、ダブルパルス YAG レーザーのスリット光によって計測断面を可視化する。鏡を用いることで可視化断面における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瞬時の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。

水理条件を表-1 に示す。実験水路は全長 10m、幅 0.25m のアクリル製であり、計測断面は水路中央の流下方向鉛直断面である。実験では、摩擦レイノルズ数 Re_s を約 500 とほぼ一定にし、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。

3. 解析結果と考察

(1) 水面変動の主成分分析：

計測された水面変動成分 $h'(x, t)$ に対して POD 解析を行い、水面変動の主成分を抽出した¹⁾。図-2 に Case 4 ($Fr=1.23$) 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 9 割が再現されている。 ϕ_m により示される水面変動の主成分は正弦波形に近似しており、モードの次数 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モードでも見られることから、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、 $Fr > 1.0$ では $m=1$ において ϕ_m はほぼ一様な分布形状となっており、射流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空間相関：

次に、水面変動主成分 ϕ_m の振幅 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、 a_m と (u', v') 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 の分布に関する $COR_{h'mu'}$ 、 $COR_{h'mv'}$ の位相平均を算出した。結果を図-3 に示す。水表面キーワード：開水路流れ、水面変動、乱流構造、同時画像計測、主成分分析、相関解析

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

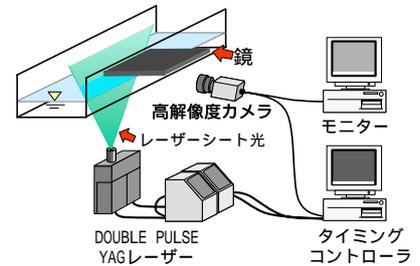


図-1 計測システムの概要

表-1 水理条件

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

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

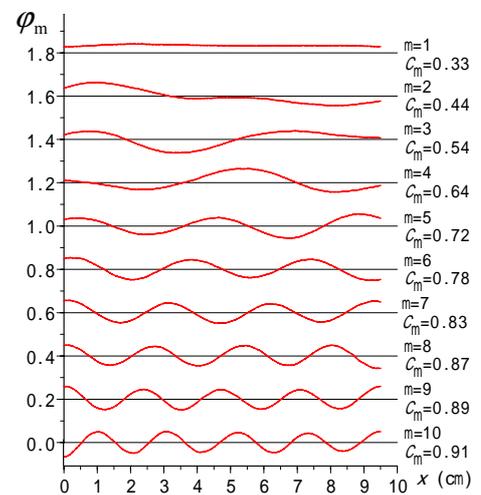


図-2 水面変動の固有ベクトル ϕ_m (Case4, 縦軸を 0.2 ずつ移動させており、各モード m の横軸が実際には原点を通る)

面近くにおいて、 $COR_{h'mu'}$ 、 $COR_{h'mv'}$ の分布は、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。このことより、自由水表面直下では水面形状に沿った流れになっていることが推察

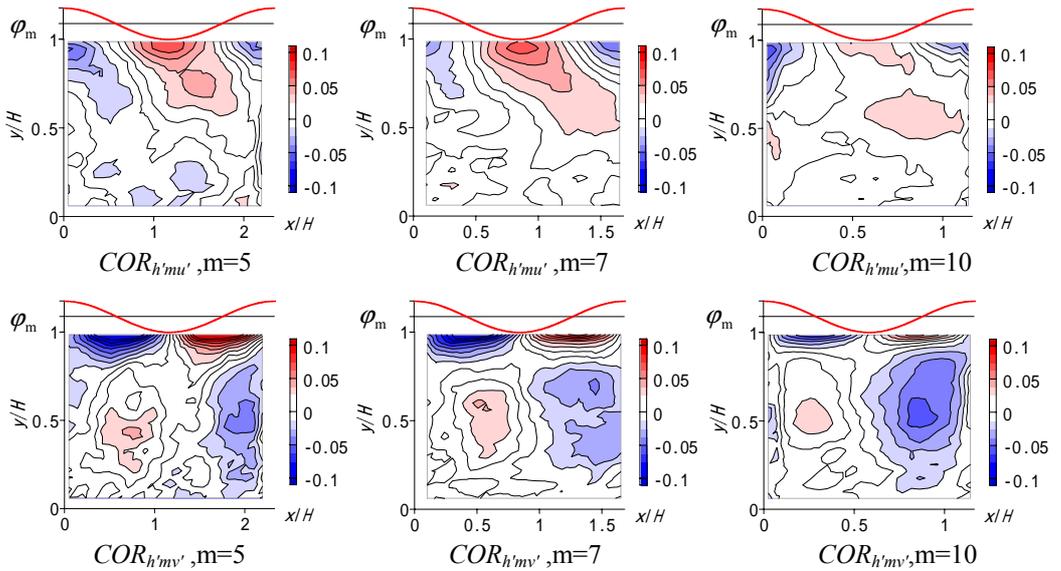


図-3 ϕ_m の位相に対する $COR_{h'mu'}$ 、 $COR_{h'mv'}$ の分布 (Case 4, $Fr=1.23$, $m=5,7,10$, 図の上方に固有ベクトル ϕ_m の形状を併示)

される。一方、流れの鉛直中央部分での $COR_{h'mv'}$ においては、どのモードの図においても、波頂 波底で正、波底 波頂で負の相関がみられる。これらのことより、水面変動主成分と流速変動の空間相関を介してみられる開水路流れの乱流構造は、自由水表面近傍での水面変動の影響が顕著な層(水面影響層)と、流れ中央での大規模な乱流構造の層とに分けられることがわかる。

(3) 水面変動の影響範囲：

水面影響層の層厚が、水面変動の流下方向スケールや水面変動強度 Fr 数など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。

$$\delta_m = \frac{1}{C_{\max}} \sum_{y=y_h}^{y_{c0}} C_y \Delta y \quad (1)$$

ここに、 C_y ： ϕ_m の位相が $1/2, 3/2$ における $COR_{h'mv'}$ の鉛直分布の平均値 ($1/2$ 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_{c0} ： C_y の符号が入れ替わるときの y の値、 Δy ：測定間隔である。

図-4に鉛直方向層厚スケール δ_m/H と波長 L_m/H の関係を示す。図-5に δ_m/H と水面変動強度 h'_m/H との関係を示す。両図より、全ての Case において、 L_m/H および h'_m/H が増加するに伴って δ_m/H の値は大きくなっている。これより、波長・変動強度の大きい水面変動成分ほど内部の流速変動に対する影響範囲が大きいことがわかる。また、低 Fr 数においては $L_m/H \cdot h'_m/H$ に

ともなう δ_m/H の増加率が相対的に大きいものに対して高 Fr 数ではその増加率は小さくなっており、同一の $L_m/H \cdot h'_m/H$ 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小さくな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.

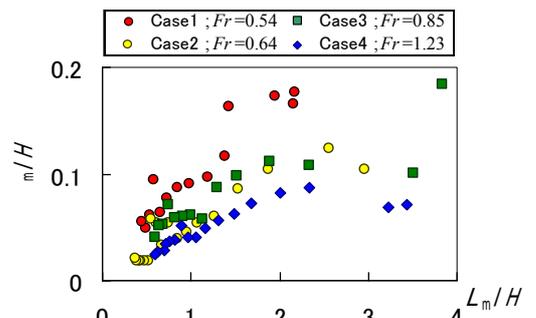


図-4 層厚スケール δ_m/H と波長 L_m/H との関係

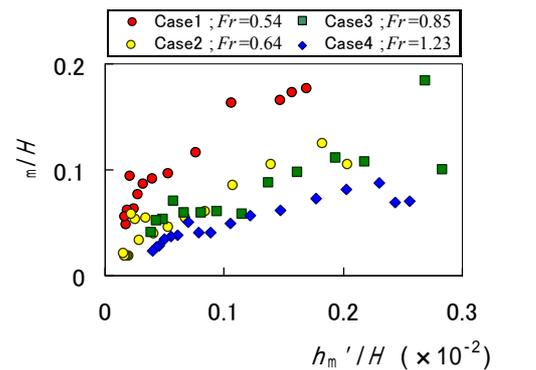


図-5 層厚スケール δ_m/H と水面変動強度 h'_m/H との関係