

開水路棧粗度に加わる流体力と流れ構造との関係

RELATIONSHIP BETWEEN DRAG AND LIFT FORCES ACTING ON STRIP ROUGHNESS ON BED IN OPEN-CHANNEL FLOWS AND FLOW STRUCTURE

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・造士快竹³・松本健太郎⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yoshitake ZOSHI and Kentaro MATSUMOTO

¹正会員 博(工) 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

The equivalent sand roughness value in open-channel flows with strip roughness on the bed has been investigated. It was already pointed out that the maximum equivalent sand roughness occurs at a value of λ/k approximately equal to 8.0 (λ =strip roughness spacing, k =roughness height). However, the effects of Froude number on the flow structure in open-channel flows with strip roughness have not been investigated. In this study, the three component velocities, flow depth above the strip roughness and drag and lift forces acting on the strip roughness were measured with an electromagnetic current meter, supersonic wave gauge and three components load cell. It was found that the vertical velocity fluctuations near the free surface are affected by water surface fluctuations about 10% in high Froude cases. The vertical velocity fluctuations are also affected by the vortex generated near the strip roughness.

Key Words : strip roughness, simultaneous measurements, drag and lift forces, turbulence

1. はじめに

開水路底面に設置された棧粗度流れに影響を与えるパラメータは、棧粗度高さを k 、棧粗度間隔を λ 、水深を H 、水路幅を B とした時、次元解析的考察より、無次元粗度間隔 λ/k 、相対水深 H/k 、アスペクト比 B/H 、フルード数 $Fr \equiv U_m / \sqrt{gH}$ およびレイノルズ数 $Re \equiv 4RU_m / \nu$ と推定される。ここに、 U_m は断面平均流速、 g は重力加速度、 R は径深、 ν は動粘性係数である。

Moody線図を考慮すると高レイノルズ数ではレイノルズ数の影響は相対水深 H/k に比べると微小と考えられる。富永¹⁾は高さ $k=5\text{mm}$ の正方形棧粗度の無次元粗度間隔 λ/k を2, 4, 8, 16に変化させると共に相対水深 H/k を10, 16に変化させてレーザー流速計を用いた乱流計測を行った結果、相対水深 H/k よりも無次元粗度間隔 λ/k が支配的であること、および側壁による摩擦損失よりも棧粗度による形状損失が支配的なためにアスペクト比 B/H の影響も微小であると指摘した^{2,3)}。したがっ

て、開水路棧粗度流れにおける支配パラメータは、無次元粗度間隔 λ/k およびフルード数 Fr と考えられる。

足立^{4,5)}は棧粗度高さ $k=5\text{mm}$ の長方形棧粗度の無次元粗度間隔 λ/k を2.5~160の間で7ケースに変化させて流速測定を行い、底面付近の流速分布を対数則にフィットさせることで相当粗度を算出し、 $\lambda/k=8$ で相当粗度が最大になることを示した。Knight & Macdonald⁶⁾も高さ $k=3\text{mm}$ の正方形棧粗度の無次元粗度間隔 λ/k を3.5~167の間で9ケースに変化させてプロペラ流速計で流速分布を計測し、足立^{4,5)}と同様に $\lambda/k=8$ で相当粗度が最大になることを示した。富永¹⁾も類似の実験を行い、同様の結論を得ている。近年、Leonardi *et al.*⁷⁾およびOrlandi *et al.*⁸⁾は閉管路流においてレイノルズ数を4200に固定し、無次元粗度間隔 λ/k を0.33~19の間で12通りに設定してDNS計算を行い、 $\lambda/k=7$ の時に相当粗度が最大になることを示した。

一方、開水路棧粗度流れに及ぼすフルード数 Fr の影響を検討した研究は少ない。吉村・藤田^{9,10)}は $k=9\text{mm}$ の正方形棧粗度の無次元粗度間隔 λ/k を5, 10に変化させ

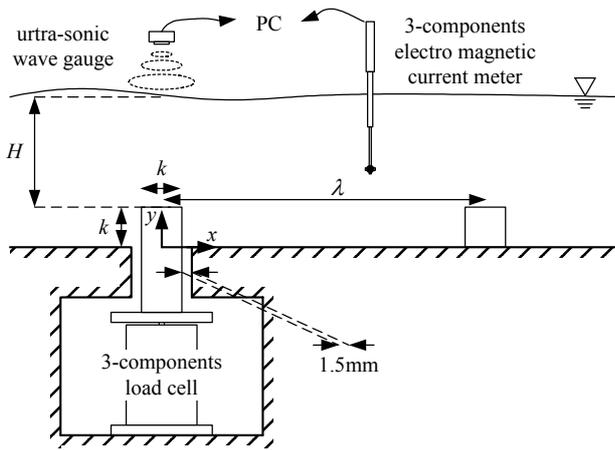


図-1 実験装置

ると共に、フルード数 Fr を0.25, 0.4, 0.6と変化させてPIV計測とビデオカメラによる水面変動計測を行った。その結果、フルード数が増加すると水面変動特性が変化するため、半水深以上の流速分布が変化することを示したが、粗度からのはく離渦の挙動や水面変動、流速変動、粗度に加わる流体力などについての検討は行っていない。粗度の破壊は瞬間的な抗力あるいは揚力によって生じることがあり、そのため、瞬間抗力および瞬間揚力を解明すると共に、それらに影響を及ぼす水量を解明する必要がある。本研究は底面に粗度を有する開水路流において、瞬間水深、瞬間流速、粗度に加わる瞬間抗力および瞬間揚力をそれぞれ同時計測し、流体力と流れの構造との関係を解析し、それらを解明しようと試みたものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ4.2m、幅0.1m、高さ0.31mの水路底面に、高さ $k=0.03\text{m}$ の正方形粗度を設置した。流下方向に x 軸、 x 軸に直角上向き y 軸をとる。実験条件は表-1に示すように、粗度流れに影響を与えるパラメータの内、無次元粗度間隔 λ/k 、相対水深 H/k 、アスペクト比 B/H を固定し、フルード数 Fr のみを変化させた。F01のとき水路勾配 $I=1/1500$ 、F03では $I=1/160$ 、F05では $I=1/60$ 、F07では $I=1/30$ とし下流堰により水深を調節した。上流から3m下流の底面下部に x 方向の瞬間抗力 $\tilde{f}_x = F_x + f_x$ 、 y 方向の瞬間揚力 $\tilde{f}_y = F_y + f_y$ が測定可能な3分力計を設置して粗度と接合した。ここに、 F_x 、 F_y は時間平均値を、 f_x 、 f_y は変動成分を示す。粗度と水路底面との間隙は1.5mm、粗度の設置数は計測部より上流側に11本、下流に3本の合計15本である。

3成分電磁流速計を用いて3分力計が設置された粗度と1つ下流の粗度との間の領域において、 x 、 y 方向

表-1 実験条件

case	λ/k	H/k	B/H	Fr
F01	8	4	0.83	0.1
F03				0.3
F05				0.5
F07				0.7

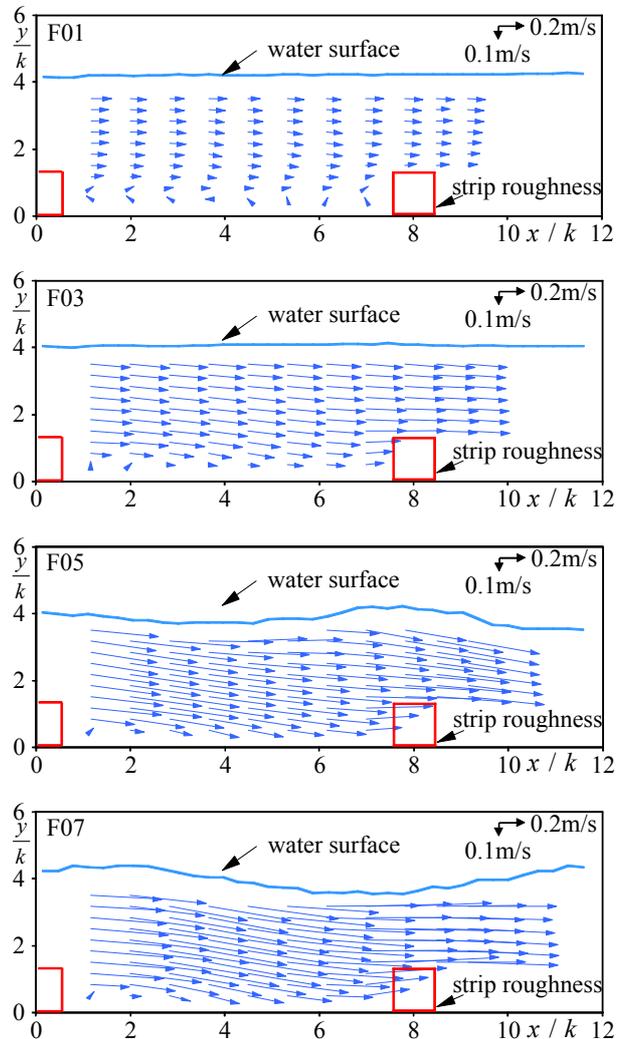


図-2 流速ベクトルおよび時間平均の水面形

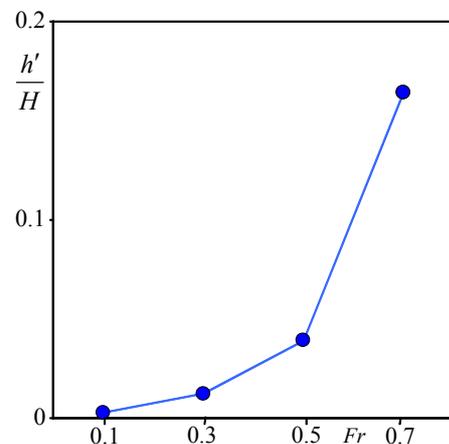


図-3 水面変動の標準偏差 h' とフルード数の関係

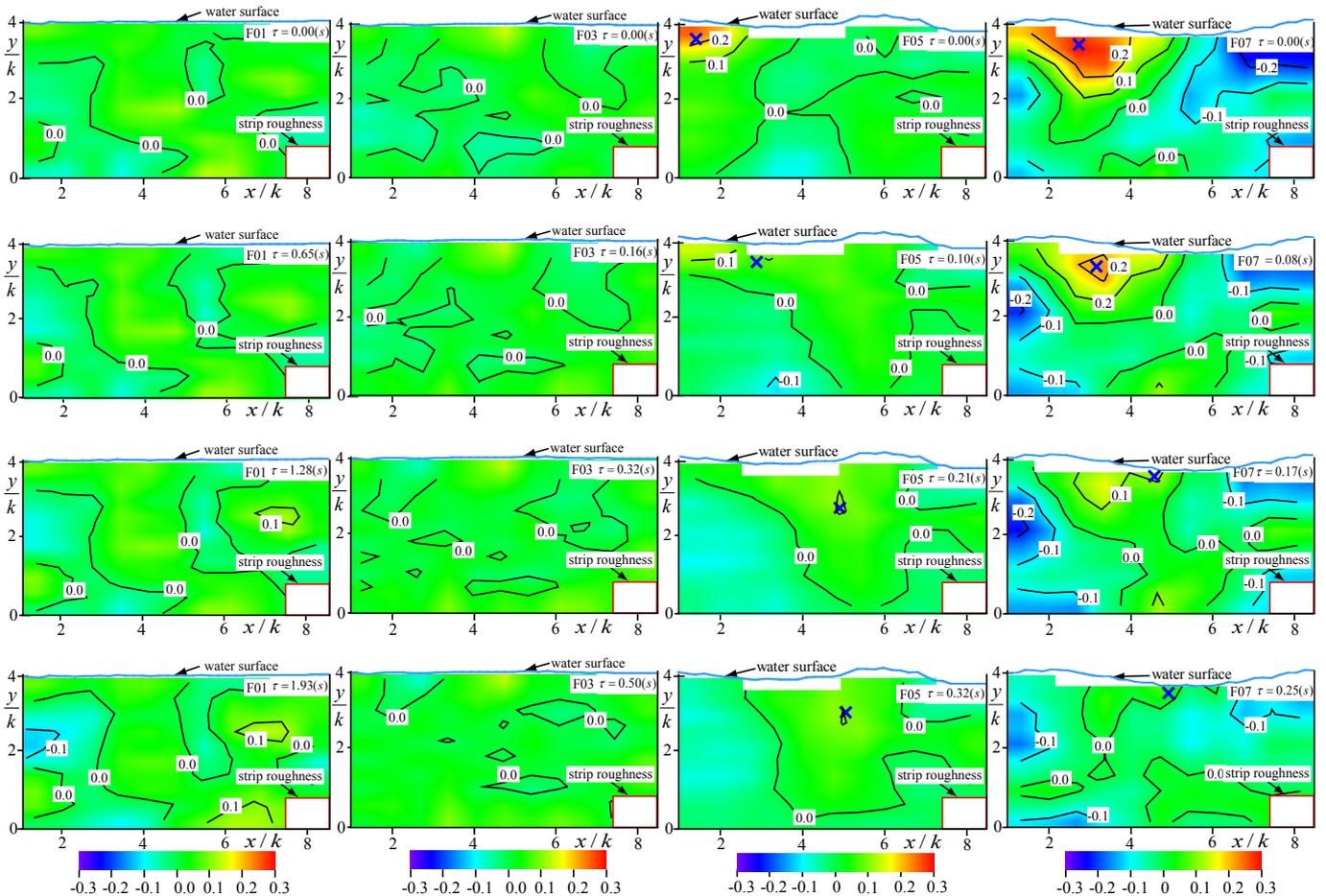


図-4 水面変動と鉛直流速変動の相互相関

にそれぞれ8または11, 7または10のメッシュで構成される101点の x , y 軸方向の瞬間流速 $\tilde{u} = U + u$, $\tilde{v} = V + v$ を100Hzで40.96s間計測した. ここに, U , V は時間平均値を, u , v は変動成分を示す. 3成分電磁流速計の計測部の直径 ϕ は13mm, 応答速度は0.05s, 正確な値を得るため壁面および水面からは15mmの間隙を確保している. 流速測定時に瞬間抗力 \tilde{f}_x , 瞬間揚力 \tilde{f}_y を3分力計を用いて, 栈粗度上部の瞬間水深 $\tilde{h} = H + h$ を超音波波高計を用いて100Hzで40.96s間の同時計測を行った. ここに, h は水深の変動成分である. 流下方向の時間平均水深 H はポイントゲージを用い0.01m毎に計測を行った.

3. 実験結果および考察

(1) 時間平均流速および水面形

図-2に水路中央断面($z/B = 0.5$)における流速ベクトルおよび時間平均の水面形を示す. 低フルード数のF01およびF03では水面形はほぼフラットであるが, F05では栈粗度間で減少して栈粗度上部で上昇, F07では栈粗度間

で減少して栈粗度より若干下流で上昇している. そのため, 低フルード数のF01およびF03では水面付近の流速ベクトルは水面形に平行な水平となるが, 高フルード数のF05およびF07では水面付近の流速ベクトルは水面形の影響によって粗度間の上流域で下向き, 下流域で上向きとなっている. また, フルード数の増加と共に粗度前面で発生する上昇流の強度が上昇し, 粗度背後の下降流の強度が増加する. 以上, 水面形および平均流速ベクトルがフルード数の影響を受けることが明らかとなった.

(2) 水面変動が乱流構造に及ぼす影響

図-3に粗度頂部で得られた水面変動の標準偏差 h' を時間平均水深 H で無次元化した値とフルード数 Fr との関係を示す. フルード数の増加に伴う水面変動の増加が確認される. なお, F01およびF03での水面波は極めて微小で, F05およびF07では横断方向よりも流下方向に水面変形上の変化が卓越した状態であった.

i 点の変動成分 w_i と j 点の変動成分 w_j との相互相関係数 $R_{ij}(\tau)$ は次式で求められる.

$$R_{ij}(\tau) \equiv \overline{w_i(t) \cdot w_j(t+\tau)} / (w_i' w_j') \quad (1)$$

ここに、 τ は遅れ時間、 w_i' 、 w_j' は w_i 、 w_j の標準偏差である。式(1)において、 $w_i=h$ 、 $w_j=v$ として求めた水面変動と鉛直流速変動との相互相関係数 $R_{h,v}(\tau)$ を図-4に示すと共に、ピーク位置を各図中に×印で示した。ただし、F01およびF03では値の近い極大値が複数存在するためにピーク値を示していない。低フルード数のF01およびF03では遅れ時間 τ の進行に伴う明瞭な変化は観察されず、ほぼ全域で相関係数が0に近い。これは両ケースの水面変動が小さいため、水面変動が鉛直流速変動に及ぼす影響がほとんど無いことを意味する。一方、高フルード数のF05およびF07では、 $\tau=0s$ で粗度上部の水面近傍で正のピークが存在し、遅れ時間の経過に伴い流下する。これは、高フルード数では水面の上下に伴い水面付近の流体も上下していること、また、その影響がある程度移流しても残ることを意味する。特に、F07のケースでは水面付近の正のピーク位置よりも下流側に負の領域が存在し、それが正のピークの移流と共に下流側に移流している。これは水面変動が他のケースと比較し周期的であることを示唆する。

図-5に水面変動と鉛直流速変動の相互相関係数 $R_{h,v}(\tau)$ のピーク値 $R_{h,v}^{\max}$ の減衰過程を示す。ただし、 $x/k=5$ 以降はピーク値が明瞭でないためプロットしていない。F05およびF07共に粗度近傍でピーク値を示すが、F05よりもF07の方のピーク値が大きい。これはフルード数が高いほど乱流構造が水面変動に及ぼす影響が大きいことを示唆する。また、流下に伴い両ケースとも減衰するが、 $x/k=5$ 付近のピーク値 $R_{h,v}^{\max}$ は0.1程度有しており、粗度高さの5倍程度流下しても水面変動の影響が約10%残っていることを表す。

図-6に水面変動と鉛直流速変動の相互相関係数 $R_{h,v}(\tau)$ のピーク値 $R_{h,v}^{\max}$ の鉛直断面内の移流過程を示す。両者とも、 $x/k < 2.5$ では若干底面方向に移動するが、それ以降は底面にほぼ平行である。したがって、水面変動によって鉛直流速変動が大きな影響を受ける領域は水面付近であり、影響を受けた流体塊が底面に平行に移流していると考えられる。

(3) 水面変動が棧粗度抗力および揚力に及ぼす影響

式(1)において、 $w_i=h$ 、 $w_j=f_x$ として求めた水面変動と抗力変動との相互相関係数 $R_{h,f_x}(\tau)$ を図-7(a)に、 $w_i=h$ 、 $w_j=f_y$ として求めた水面変動と揚力変動との相互相関係数 $R_{h,f_y}(\tau)$ を図-7(b)に示す。図-7(a)に着目すると、 $\tau=0s$ において $R_{h,f_x}(\tau)$ の値は全フルード数で0.06以下であり、水面変動が抗力変動に及ぼす影響はほとんど無いと判断される。また、遅れ時間が進行すると

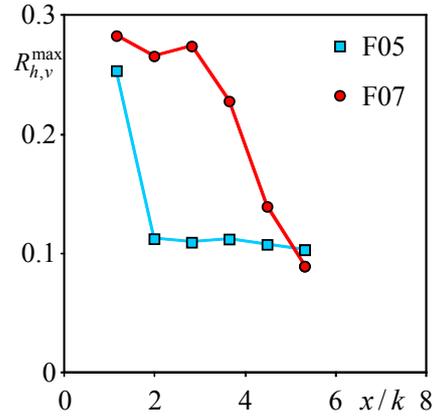


図-5 ピーク値 $R_{h,v}^{\max}$ の減衰過程

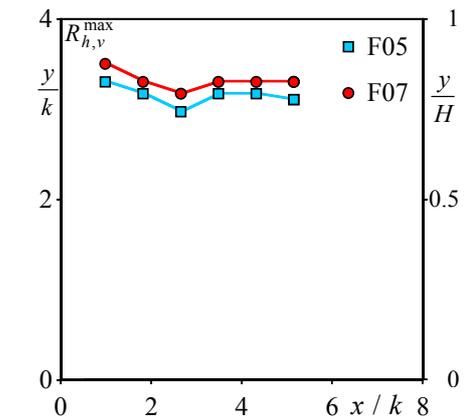


図-6 ピーク値 $R_{h,v}^{\max}$ の位置の移流過程

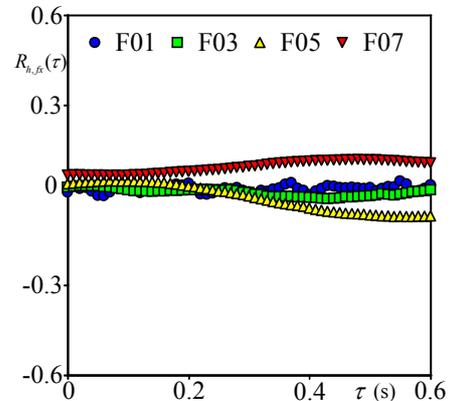


図-7(a) 水面変動と抗力変動の相互相関係数

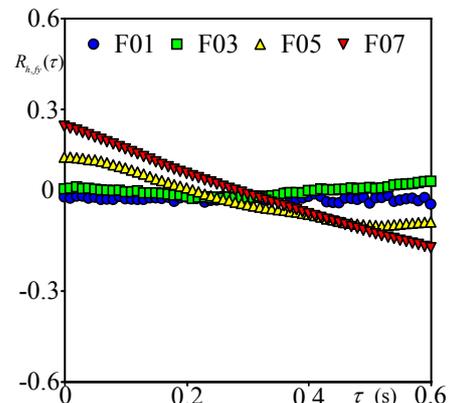


図-7(b) 水面変動と揚力変動の相互相関係数

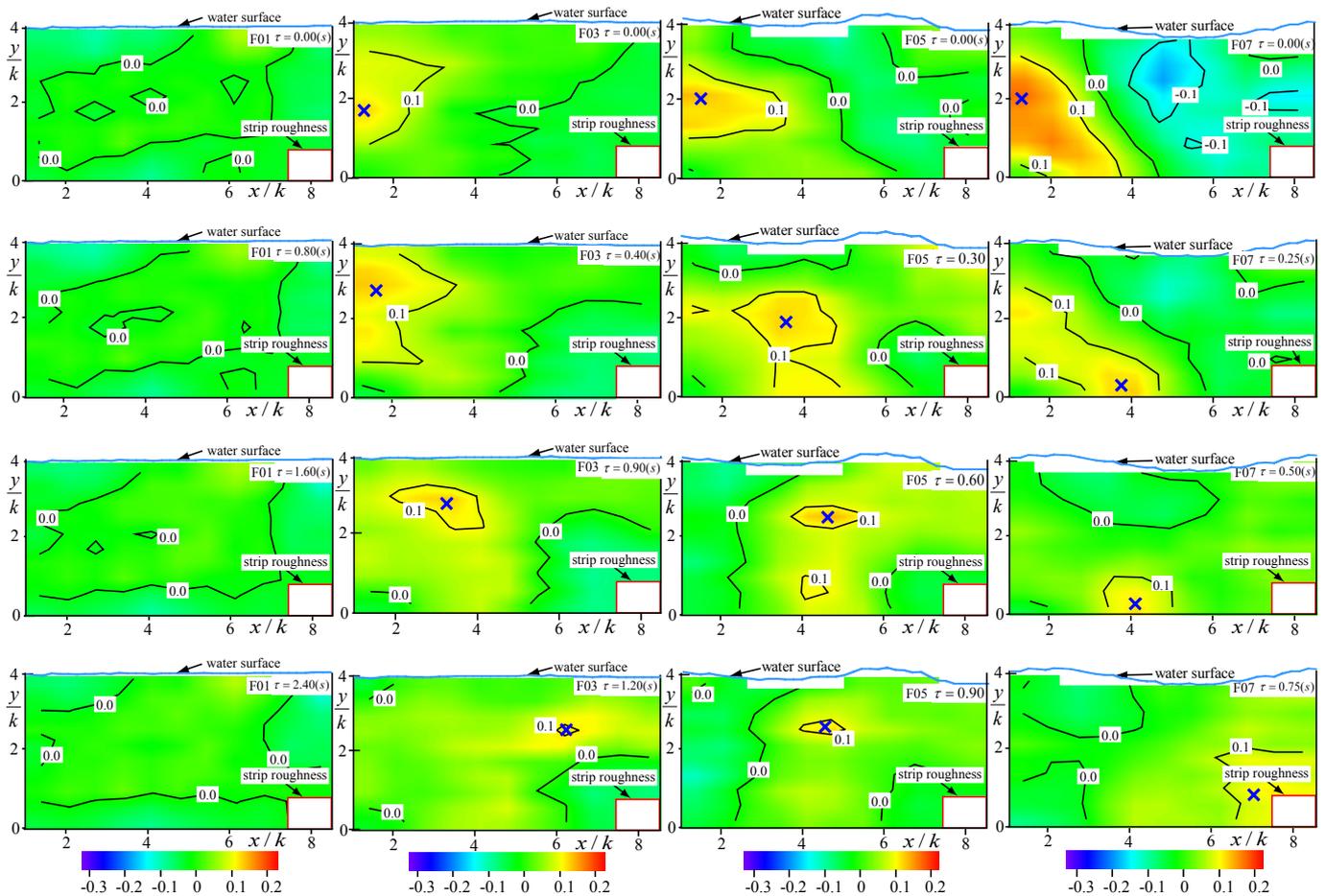


図-8 揚力変動と鉛直流速変動の相互相関係数

相関係数がF05は負値を、F07は正値を示すようになるが、両者の値が小さいことから、 $\tau=0s$ において相互相関係数がほぼゼロであることから、有意な差とは考えにくい。一方、図-7(b)に着目すると、 $\tau=0s$ において $R_{h,f_y}(\tau)$ は各フルード数で最大値を示している。これは、水面の上下に伴い同時に揚力も上下していることを意味する。また、その値がフルード数の増加に伴い増加しており、F05では約0.14、F07では約0.25である。これは、水面変動が揚力変動をF05で14%程度、F07で25%程度決定していることを示唆する。

(4) 棧粗度抗力および揚力が乱流構造に及ぼす影響

式(1)において、 $w_i = f_y$ 、 $w_j = v$ として求めた揚力変動と鉛直流速変動との相互相関係数 $R_{f_y,v}(\tau)$ を図-8に示すと共に、ピーク位置を各図中に×印で示した。ただし、F01では値の近い極大値が複数存在するためピーク位置を示していない。F01以外のケースでは $\tau=0s$ において棧粗度上部の半水深付近で高い相関係数を示している。これは、棧粗度の揚力が正の時に棧粗度上部で上昇流が発生すること、また、揚力が負の時に棧粗度上部で下降流が発生することを意味する。一方、 $\tau>0s$ では遅れ時

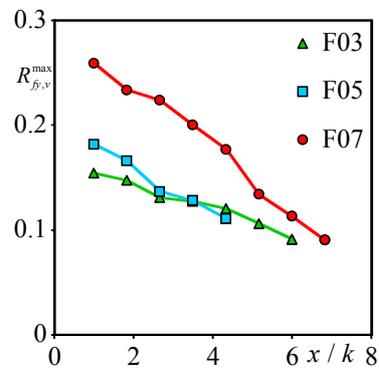


図-9 ピーク値 $R_{f_y,v}^{max}$ の減衰過程

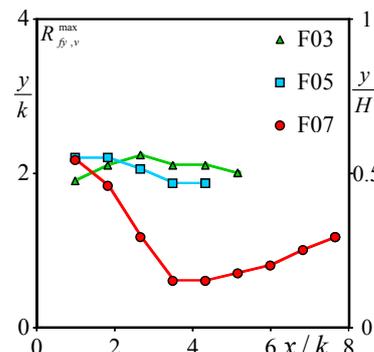


図-10 ピーク値 $R_{f_y,v}^{max}$ の位置の移流過程

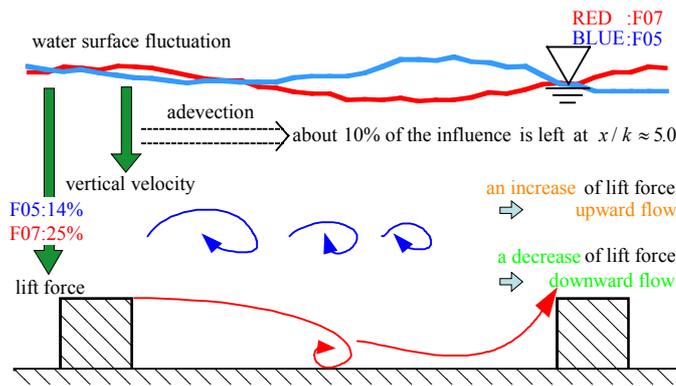


図-11 棧粗度間で生じる乱流構造の模式図

間の進行に伴いピーク値が低下すると共に下流に移流する様子が観察される。ただし、F03およびF05はピーク位置の鉛直方向の移動が小さいのに対し、F07では底面に接近する傾向がある。

図-9に揚力変動と鉛直流速変動の相互相関係数 $R_{f_y, v}(\tau)$ のピーク値 $R_{f_y, v}^{\max}$ の減衰過程を示す。ただし、F01は明確なピーク値が確認できなかったため示していない。フルード数の増加に伴い粗度周辺での相関係数が増加している。その値は、F03で約0.15、F07で約0.25に達する。流下に伴い全てのフルード数でピーク値が減少するが、 $x/k=7$ においても全てのフルード数で約0.1の値を有する。これは、粗度高さの5倍流下しても揚力変動が鉛直流速変動の約10%を決定することを意味する。

図-10に揚力変動と鉛直流速変動との相互相関係数 $R_{f_y, v}(\tau)$ のピーク値 $R_{f_y, v}^{\max}$ の鉛直断面内の移流過程を示す。F03およびF05では鉛直方向への変化は少なく、ほぼ底面に平行に移流している。図-2のベクトル図から、F07の水面形は粗度間で最も下に凸の水面形であり、それに伴い流速ベクトルが粗度間の上流側では下に凸、下流側で上に凸となっている。したがって、F07では流線の曲がりに応じてピーク値が移流したと考えられる。

4. おわりに

本研究は底面に棧粗度を有する開水路流において、瞬間水深、瞬間流速、棧粗度に加わる瞬間抗力および瞬間揚力をそれぞれ同時計測し、流体力と流れの構造との関係を解析したものである。その結果、棧粗度間に図-11に示す乱流構造が存在することが示唆された。以下に結論を示す。

- (1) フルード数が0.5を越えると水面変動が鉛直流速変動に影響を与え、粗度高さの5倍程度流下しても10%程度の影響が残っている。
- (2) 水面変動は抗力変動にはほとんど影響を与えないが、揚力変動には影響を与える。フルード数が0.5および0.7

で揚力変動のそれぞれ約14%、25%を水面変動が決定している。

(3) 棧粗度上部の流体が上下することで揚力変動が発生する。棧粗度を越えた流れはフルード数が0.1~0.5では鉛直方向に大きな移動をせずに移流する。一方、フルード数が0.7の場合は、水面形の変形に伴い凹部の上流域では下方に、下流域では上方に渦が移流する。

参考文献

- 1) 富永晃宏：棧粗度の相対棧間隔が開水路の乱流構造に及ぼす影響，水工学論文集，第36巻，pp.163-168，1992。
- 2) 富永晃宏，田本典秀：角形断面棧型粗度を有する開水路流れの乱流構造，応用力学論文集，Vol.5，pp.727-734，2002。
- 3) Tominaga, A, Nezu, I., Esaki, K. and Nakagawa, H.: Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows, *J. Hydraulic Research*, Vol.27, No.1, pp.149-173, 1989.
- 4) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，第104号，pp.33-44，1964。
- 5) 足立昭平：開水路における棧型人工粗度の実験的研究，京都大学防災研究所年報，第3号，pp.17-33，1959。
- 6) Knight, D.W. and Macdonald, J.A.: Hydraulic resistance of artificial strip roughness, *J. Hydr. Div.*, Vol.105, pp.675-690, 1979.
- 7) Leonardi, S., Orlandi, P., Smalley, R.J., Djenidi, L. and Antonia, R.A.: Direct numerical simulations of turbulent channel flow with square bars on the wall, *J. Fluid Mech.*, Vol.491, pp.229-238, 2003.
- 8) Orlandi, P., Leonardi, S. and Antonia, R.A.: Turbulent channel flow with either transverse or longitudinal roughness elements on one wall, *J. Fluid Mech.*, Vol.561, pp.279-305, 2006.
- 9) 吉村英人，藤田一郎：境界埋め込み法を取入れたLESによる開水路棧粗度乱流場の上昇剥離渦の解析，水工学論文集，第51巻，pp.769-774，2007。
- 10) 吉村英人，藤田一郎：水面変動を考慮した粗面乱流場のLESおよびPIVによる解析，水工学論文集，第52巻，pp.1015-1020，2008。

(2009. 9. 30受付)