

開水路栈粗度に加わる流体力と流れ構造との関係

九州工業大学工学部	学生員	○松本健太郎
九州工業大学大学院	学生員	造士快竹
九州工業大学大学院	正会員	鬼束幸樹
九州工業大学大学院	フェロー会員	秋山壽一郎

1. はじめに

開水路底面に設置された栈粗度流れに影響を与えるパラメータは、栈粗度高さを k 、栈粗度間隔を 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、およびレイノルズ数と推定される。

富永¹⁾は正方形栈粗度の無次元粗度間隔 λ/k を変化させると共に相対水深 H/k も変化させ、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と、アスペクト比 B/H の影響が微小であることを指摘した。足立²⁾も無次元粗度間隔を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、無次元粗度間隔 $\lambda/k=8$ で相当粗度が最大になることを示した。

一方、開水路栈粗度流れに及ぼすフルード数の影響を検討した研究は少なく、栈粗度からの離渦の挙動や水面変動、流速変動、栈粗度に加わる流体力などについての検討は行われていない。本研究は底面に栈粗度を有する開水路流において、瞬間水深、瞬間流速、栈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。

2. 実験条件および実験装置

図-1に示す長さ4.2m、幅0.1m、高さ0.12mの水路底面に、高さ $k=0.04\text{m}$ の正方形栈粗度を設置した。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、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 を変化させた。上流から3m下流の底面下部に x 方向の瞬間抗力、 y 方向の瞬間揚力が測定可能な3分力計を設置して栈粗度と接合した。流速測定は、3分力計が設置された栈粗度と1つ下流の栈粗度との間の領域において101点のメッシュ状の計測点で3成分電磁流速計を用いて行い、栈粗度上部の瞬間水深は超音波波高計を用いて計測された。それぞれの計測は100Hzで40.96秒間、同時に行われた。

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に流速ベクトルおよび時間平均の水面形を示す。F01およびF03では水面形はほぼフラットであるが、F05、F07では栈

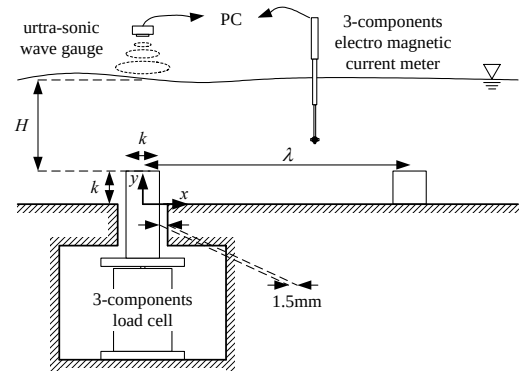


図-1 実験装置

表-1 実験条件

case	λ/k	H/k	B/H	Fr
F01	8	12	0.83	0.1
F03				0.3
F05				0.5
F07				0.7

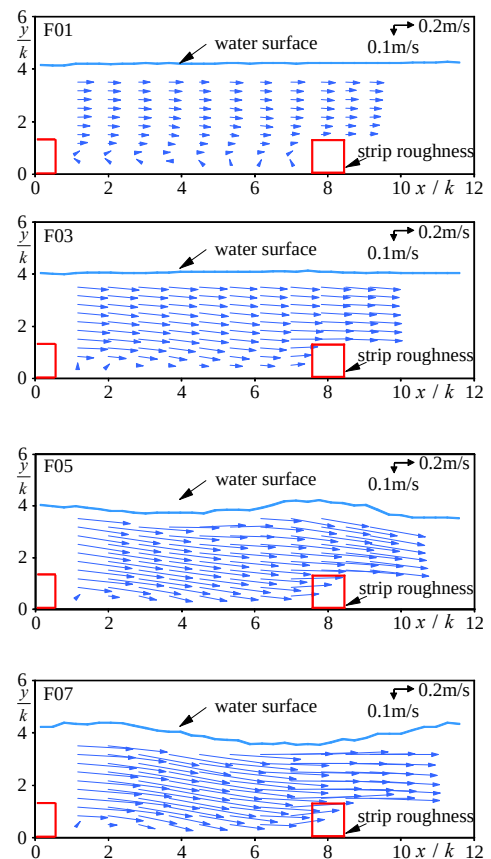


図-2 流速ベクトルおよび時間平均の水面形

粗度間で減少して栈粗度上部付近で上昇している。そのため、水面付近の流速ベクトルは水面形の影響によって水面形に沿った向きをとっている。また、フルード数の増加と共に粗度前後で発生する上昇流と下降流の強度も増加している。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) 水面変動が栈粗度抗力および揚力に及ぼす影響

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。

$$R_{ij}(\tau) = \overline{w_i(t) \cdot w_j(t+\tau)} / (\overline{w_i^2} \cdot \overline{w_j^2}) \quad (1)$$

式(1)に示す τ は遅れ時間、 w_i' 、 w_j' は w_i 、 w_j の標準偏差である。図-3(a)、(b)に式(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 $R_{h,f_x}(\tau)$ また、 $w_i = h$ 、 $w_j = f_y$ として求めた水面変動と揚力変動との相互相関係数 $R_{h,f_y}(\tau)$ を示す。図-3(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。一方、図-3(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刻に揚力も上下していること意味する。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意味する。

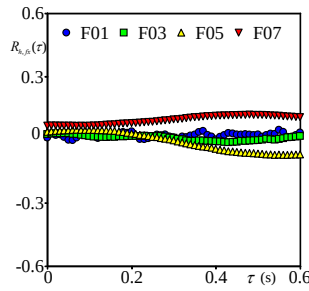


図-3(a) 水面変動と抗力変動の相互相関係数

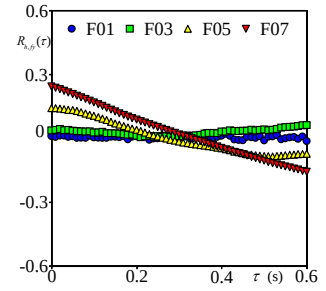


図-3(b) 水面変動と揚力変動の相互相関係数

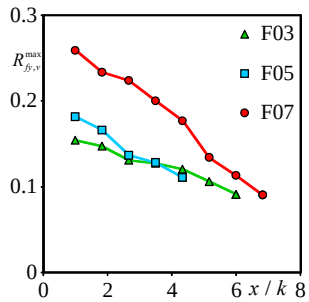


図-4(a) ピーク値 $R_{h,f_y}^{\max}$ の減衰過程

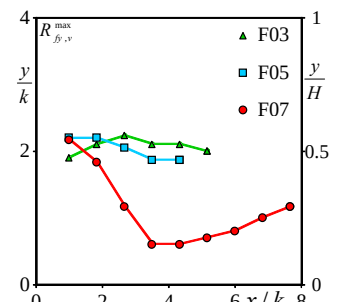


図-4(b) ピーク値 $R_{h,f_y}^{\max}$ の移流過程

(3) 栈粗度抗力および揚力が乱流構造に及ぼす影響

図-4(a)、(b)に式(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 $R_{f_y,v}(\tau)$ の最大値の減衰および移流過程を示した。

図-4(a)に着目すると、フルード数の増加に伴い粗度周辺での相関値が増加している。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。また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。

図-4(b)に着目すると、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は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

本研究は底面に栈粗度を有する開水路流において、瞬間水深、瞬間流速、栈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。以下に結論を示す。

- (1) 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。
- (2) 栈粗度上部の流体が上下することで揚力変動が発生する。栈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、水面形に沿った形で渦が移流する。

参考文献

- 1) 富永晃宏：栈粗度の相対栈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) 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。