

# 斜行低水路を有する複断面開水路の流れ —高水敷上の樹木群が流れに及ぼす影響—

ABOUT THE CHANGE OF BEHAVIOR OF THE FLOW BY THE EXISTENCE OF  
TREES ON THE FLOOD PLAIN IN SKEWED COMPOUND OPEN CHANNEL  
— DISTRIBUTION OF TREES ON THE FLOOD PLAIN AND CHANGE IN FLOW —

浦山剛史<sup>1</sup>・高水克哉<sup>2</sup>・関根正樹<sup>3</sup>・福井吉孝<sup>4</sup>

Takefumi URAYAMA, Katsuya TAKAMIZU, Masaki SEKINE and Yoshitaka FUKUI

1 学生会員 東洋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒350-8585 川越市鯨井2100)

2 工修 ㈱東京建設コンサルタント 総合河川部 (〒171-0014 豊島区池袋2-43-1)

3 学生 東洋大学工学部 環境建設学科 (〒350-8585 川越市鯨井2100)

4 正会員 工博 東洋大学工学部 環境建設学科教授 (〒350-8585 川越市鯨井2100)

It is necessary to be clear about the flow behavior in rivers influenced by the existence of trees and grasses on the flood plain. In this research, using a skewed compound channel with a group of trees on the flood plain, the behavior of flow in the main channel and the flood plain is studied. Authors' considerations are directed to phenomena due to the difference of arrangement of trees on the flood plain along the main channel. According to these experiments, if the arrangement of trees is changed for some reason, the flow in the skewed part changes in direction and scale. As a result, for maintenance of a river it is necessary for some notice to be taken of changes in this arrangement.

Numerical analysis is used in an attempt to simulate the phenomena in the compound channel. In the analysis, the 2-D shallow water theory is adopted for simplification.

**Key Words :** skewed compound open channel, trees, numerical analysis of 2-D shallow water

## 1. はじめに

我が国の河川の多くは複断面開水路であり, 流下につれて平面形状は不規則に変化し, 低水路河岸に樹木群の繁茂が多く見られる。樹木群は生態系の保全や景観の構成などの環境機能を有しているが, 洪水時には水位上昇, 堤脚沿いの高速流の発生など治水上障害となる場合があるので, 河道計画において流水抵抗の要素として考慮しなければならない。著者らは図-1, 2に示すような水路の中程に斜行低水路を有する複断面開水路を用いての模型実験や数値解析から水理学的な検討を行ってきた。斜行部高水敷上の樹木群については, 位置, あるいは規模の違いによる①流水抵抗・流速分布の変化, ②低水路内で生じる二次流セル, ③水位の変化, を検討した結果, 左岸側つまり上流側に繁茂している方が右岸側に較べて水理学的に好ましいことが解った<sup>3)</sup>。

しかし, 樹木群の配列や配置は流水抵抗を支配する大きな要因であるから, その違いが流れに及ぼす影響を考慮しておくことは意義がある。実際の河道計画においては洪水によって樹木群の一部が流失した場合や, 間断的に伐採した場合, つまり何らかの原因で樹木群の配置, 規模が元の状態から変わってしまった場合も想定しなければならない。

そこで本研究では斜行部高水敷上の樹木群の配置や配列状況の違いが流水に及ぼす影響を把握して流れに対してより適した樹木群の配置や配列についての指標を得ることを目的とし, 木製円柱を使用して模型実験を行った。併せて, 二次元浅水流モデルを用いて数値解析を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 実験水路

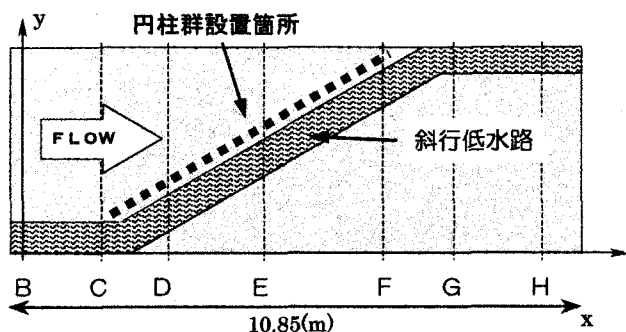


図-1 実験水路平面図

表-1 実験ケースの概要

|     | 円柱<br>設置本数 | 円柱<br>群数 | 円柱<br>列数 | 円柱<br>群密度比 | 流量<br>( $l/sec$ ) |
|-----|------------|----------|----------|------------|-------------------|
| K-0 | —          | —        | —        | —          | 4.2               |
| K-1 | 0          | 0        | —        | —          | 26.6              |
| K-2 | 99         | 1        | 1        | 0.33       | 26.6              |
| K-3 | 297        | 1        | 3        | 1          | 26.6              |
| K-4 | 198        | 2        | 3        | 0.67       | 26.6              |
| K-5 | 178        | 3        | 3        | 0.6        | 26.6              |

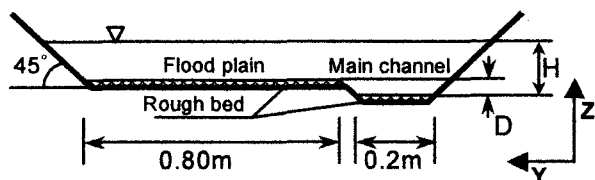


図-2 実験水路断面図

実験に使用した水路の平面図を図-1に、断面図を図-2に示す。全長1085(cm)、全幅110(cm)、高水敷高 $D=5.0(cm)$ 、低水路幅 $B=20.0(cm)$ 、高水敷幅 $B_k=80.0(cm)$ 側壁勾配45°の複断面水路である。水路床に砂を張り付けて粗面とした固定床で、勾配は1/500、実験から逆算した底面の粗度係数は0.012である。斜行低水路は傾き30°、長さ160(cm)で水路中央部に設けてある。

## (2) 実験条件・方法

実験ケースの諸元を表-1に示す。RUN K-4、RUN K-5は高水敷上樹木群の一部が流れによって、あるいは伐採によって欠け落ち、樹木群間に大きな間隔が生じた場合を想定している。樹木群として用いた木製円柱は直径 $d=0.5(cm)$ で、水没しない状態に保たれており、設置間隔(s)は全ケース共通で1.0(cm)である。また、円柱群密度比とは、RUN K-3における円柱群の占有面積と他ケースにおける円柱群の占有面積との比である。各ケースにおける流量はRUN K-1～K-4は $Q=26.6(l/sec)$ 、RUN K-0は $Q=4.2(l/sec)$ とした。各ケースにおける円柱群設置箇所模式図を図-3に示す。

実験は、ポイントゲージを用いて水深を測定し、流速はX-YおよびY-Z成分電磁流速計(タイムコンス

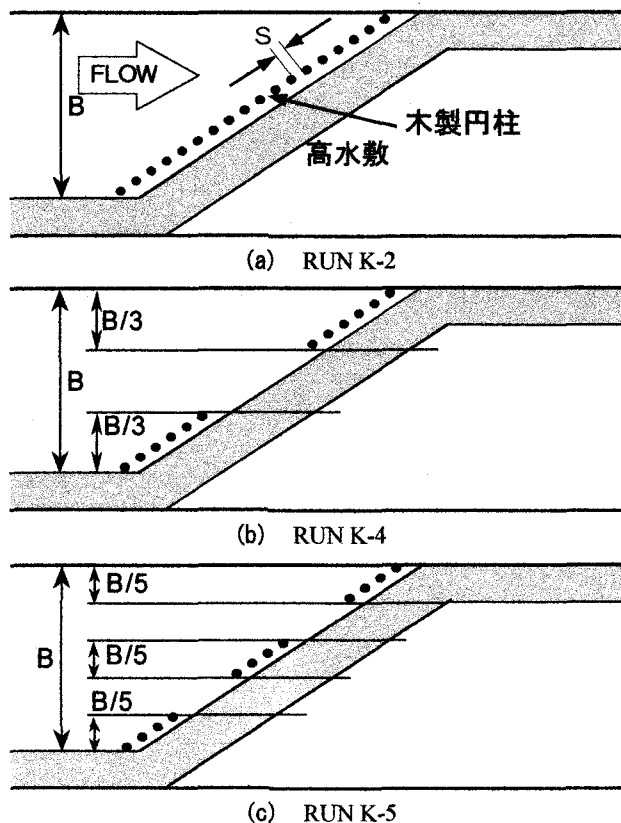


図-3 円柱群設置箇所模式図

タント0.05sec)を用いて測定した。

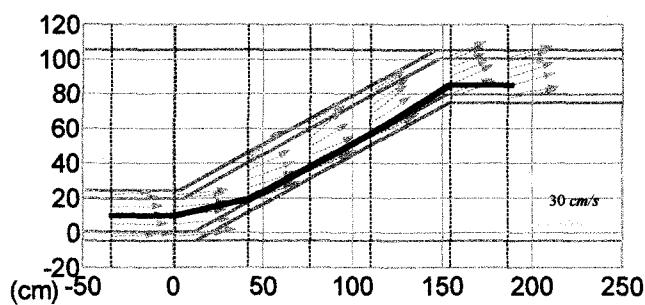
## 3. 実験結果

### (1) 下層部(低水路内)の流況

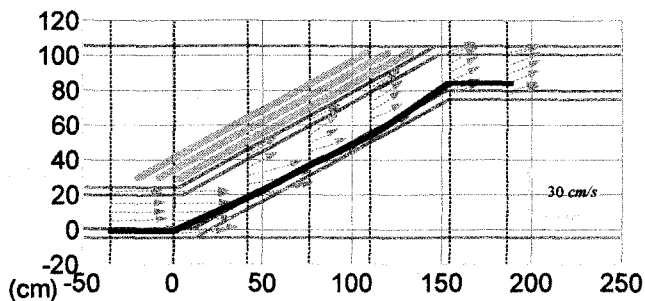
図-4は各ケースの低水路内 $z=3cm$ における流速 $uv$ ベクトルと、最大主流速の生起箇所を連結した線(図中の太線)である。各ケースとも最大主流速の生起箇所は複断面蛇行流路と同様に、斜行部出口付近で内岸側へと移行していく。RUN K-1、RUN K-3では曲がりによる遠心力の作用によって最大流速の生起箇所が右岸側に寄っている。RUN K-4、RUN K-5においては円柱群の切れ目を通っての高水敷からの流れ込みが強くなるので、低水路内の流れが斜行方向を向かず、強い直進性、つまりx方向に大きな値を持つ。そのため流速は斜行方向ではなく、x方向の流速が最大となり、最大流速の生起箇所は高水敷からの流れ込みの影響を最も強く受ける左岸側に変移する。

### (2) 上層部(高水敷上)の流況

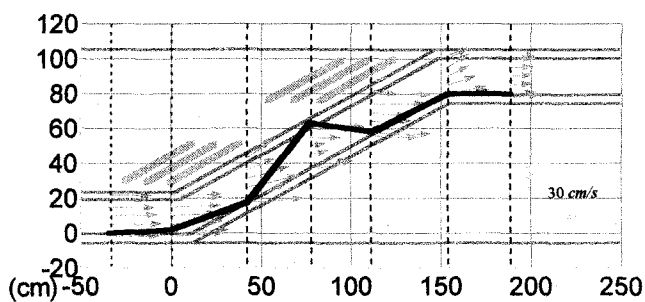
高水敷での流速 $uv$ ベクトルを図-5に示す。円柱群を設置したことによって高水敷を通過し、低水路に接近する流速が著しく減少していることが判る。また、RUN K-4、RUN K-5においては円柱群の切れ目からは速い流れが生じていることが判る。また、RUN K-5はRUN K-4に較べて円柱群密度比が小



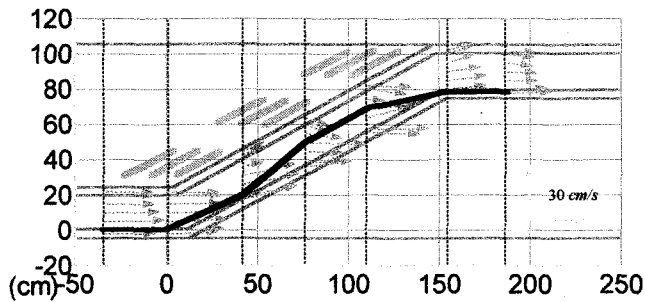
(a) RUN K-1



(b) RUN K-3

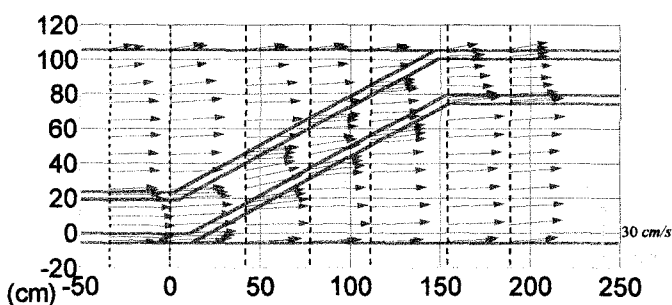


(c) RUN K-4

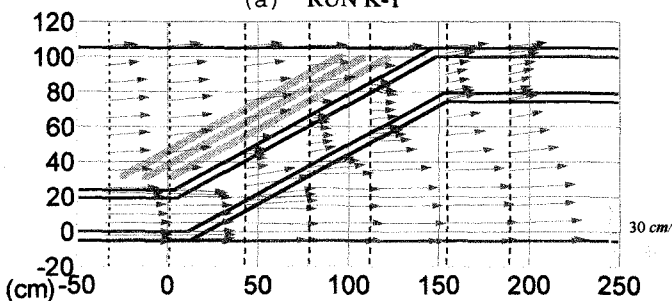


(d) RUN K-5

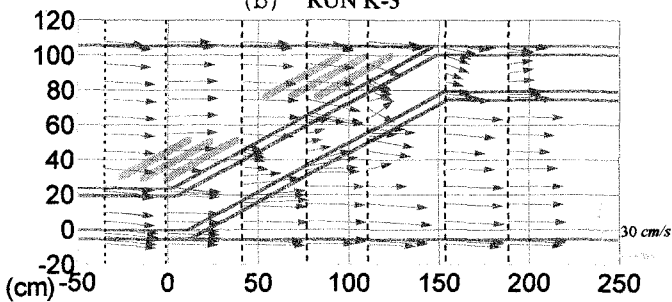
図-4 下層部での流速 $uv$ ベクトル図



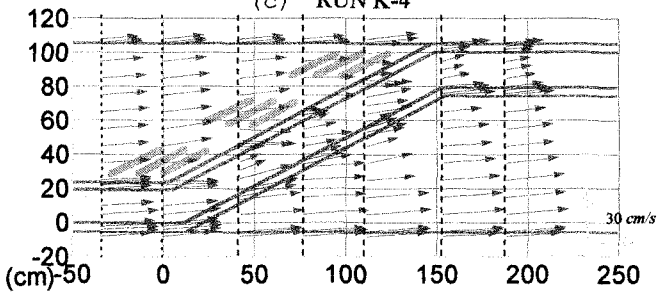
(a) RUN K-1



(b) RUN K-3



(c) RUN K-4



(d) RUN K-5

図-5 上層部での流速分布図

さく、高水敷からの流れが分散するために、低水路に接近する流速は小さくなっている。

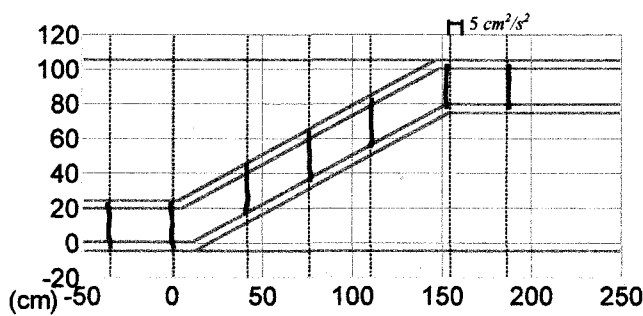
### (3) レイノルズ応力 ( $-\overline{u'v'}$ ) の分布

図-6は各ケース下層部におけるレイノルズ応力 ( $-\overline{u'v'}$ ) の分布図である。円柱群の設置状況に拘らず、斜行部入り口付近 (直線区間) では高水敷上からの流れ込みに比べて低水路を直進する流れが卓越するため、 $-\overline{u'v'}$  は小さな値となっている。RUN K-3, RUN K-4においては、円柱群の切れ目からの流れ込みは強い水平混合を生じさせ、その結果 $-\overline{u'v'}$  が増大している。

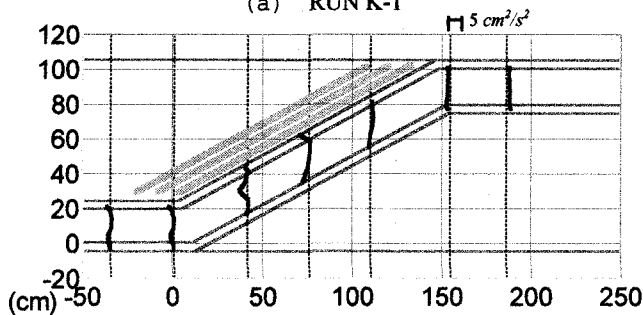
### (4) レイノルズ応力 ( $-\overline{u'w'}$ ) の分布

鉛直混合の強弱を示すレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は二次流セルの規模を検討する上で重要な水理量である。斜行低水路内中央部における $-\overline{u'w'}$ の縦断変化図を図-7に示す。RUN K-3, RUN K-4, RUN K-5においては $-\overline{u'w'}$ が高水敷高さ ( $z=5\text{cm}$ ) より上層で負の値を持つが、これは高水敷上の円柱群の作用で上層部の流速が低減され、下層部 (低水路部) との流速差によって強い鉛直混合が生じるためである。しかし、RUN K-4, RUN K-5の円柱群の切れ目では、上層部が速くなり高水敷高付近で $-\overline{u'w'}$ は正の値を持つ。

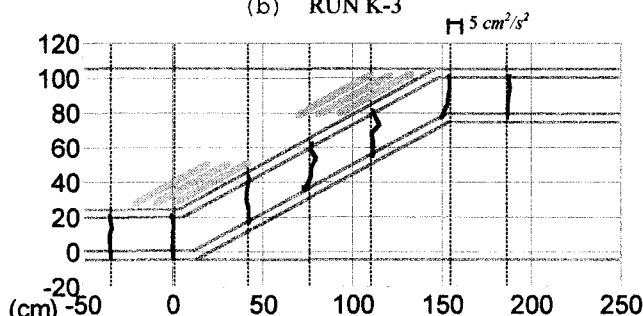
また、円柱群を設置していないRUN K-1で $-\overline{u'w'}$ は



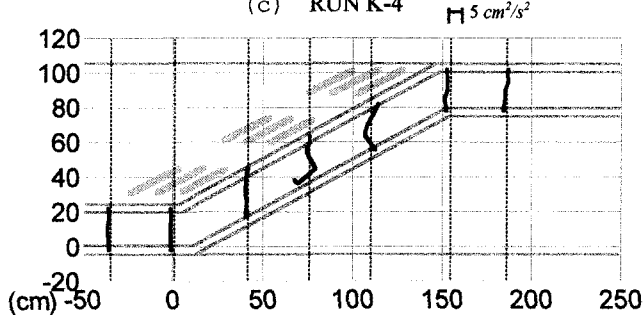
(a) RUN K-1



(b) RUN K-3

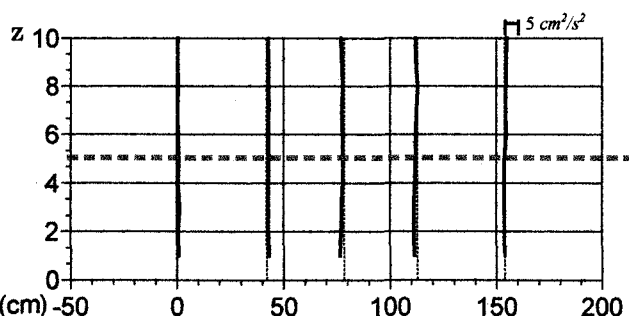


(c) RUN K-4

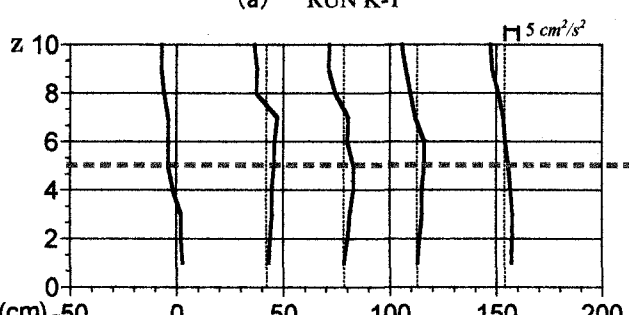


(d) RUN K-5

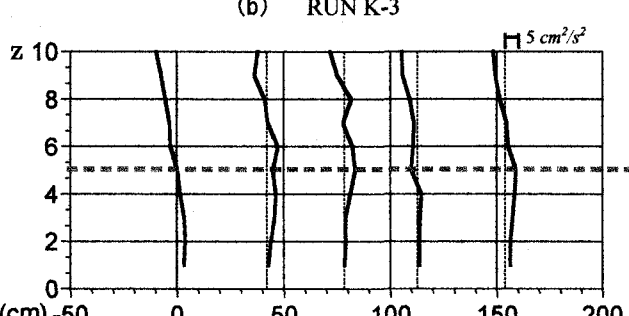
図-6 レイノルズ応力 ( $-\overline{u'v'}$ ) 分布図



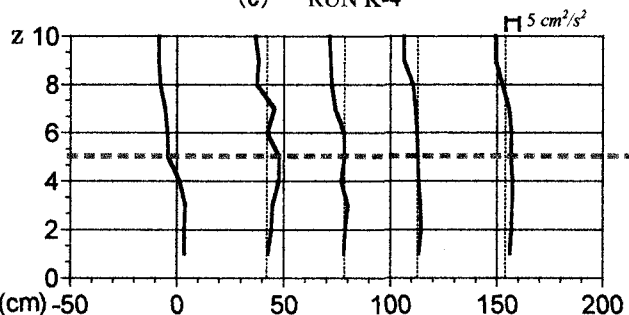
(a) RUN K-1



(b) RUN K-3



(c) RUN K-4



(d) RUN K-5

図-7 レイノルズ応力 ( $-\overline{u'w'}$ ) 分布図

ほぼ生じておらず、鉛直混合が弱いことを示している。

### (5) 二次流セル

図-8～11は各実験ケースにおける二次流セルの規模を比較したものであり、(a)、(b)、(c)はそれぞれ斜行部に入った直後 ( $x=40\text{cm}$ )、斜行部内中央部 ( $x=75\text{cm}$ )、及び出口付近 ( $x=111\text{cm}$ ) での結果を示している。RUN K-1においては流下するにつれて二次流セルは発達し、斜行部内出口付近 ( $x=111\text{cm}$ ) の地点では低水路内一杯に広がる。円柱群を設置した場合も同様に二次流セルは発達していくが、RUN K-4、RUN K-5においては円柱群の切

れ目からの流れ込みが卓越するため、発達が阻害される。従って二次流セルによる河床洗掘の恐れは小さいと言える。

また、鉛直混合が弱いRUN K-1で各断面での二次流セルの規模は最大になっていることから、レイノルズ応力  $-\overline{u'w'}$  は二次流セルの発達、及び減衰過程における重要な要素であると言える。

### (6) 抗力

斜行部上下流の直線区間で運動量 ( $Fd$ ) を求めその差から抗力を算出し、その値をRUN K-1における抗力の値 ( $Fd_0$ ) で無次元化した結果を図-12に示す。樹木群間の間隔を空けた結果、局所的に流下

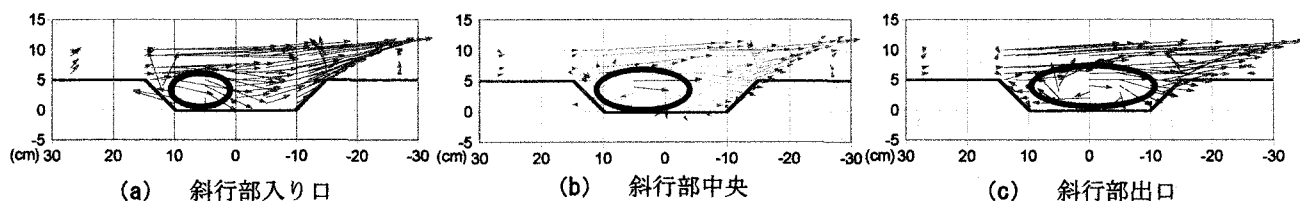


図-8 流速 $v, w$ ベクトル図 (RUN K-1)

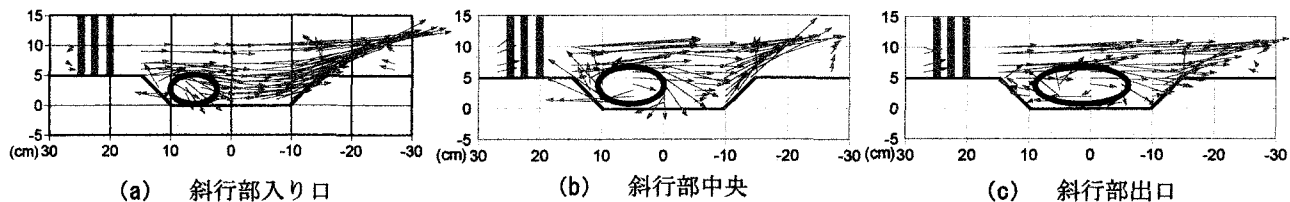


図-9 流速 $v, w$ ベクトル図 (RUN K-3)

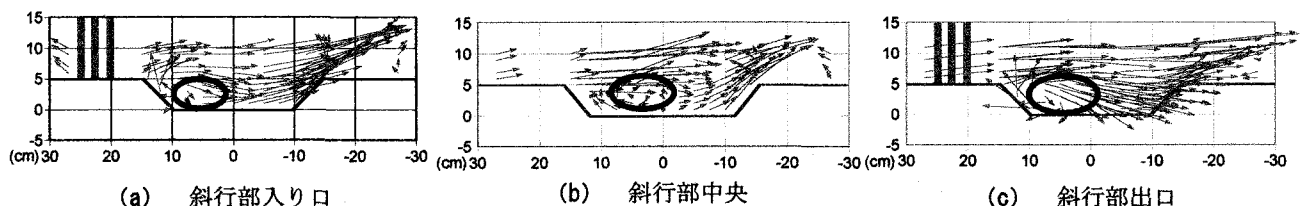


図-10 流速 $v, w$ ベクトル図 (RUN K-4)

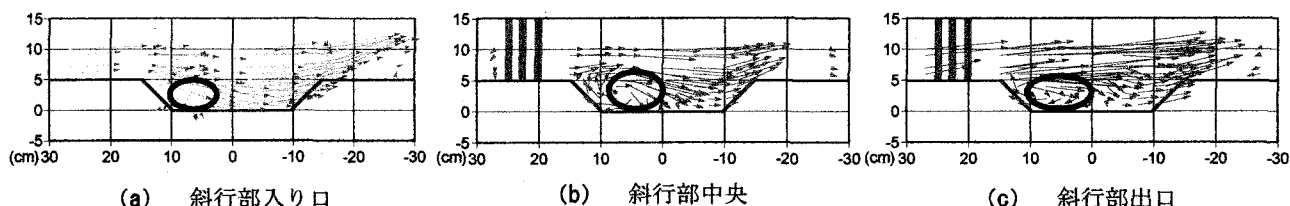


図-11 流速 $v, w$ ベクトル図 (RUN K-5)

方向に速い流れが生じたものの抗力の値は本数が多いケースから順に並んだ。このことから樹木の設置間隔 (s) が等しい場合、樹木の総本数が抗力値を支配していると言える。

#### 4. 数値解析

高水敷上に樹木群が存在する場合、その配置や配列によって平面的な流況及び低水路内の流速分布にまで大きく影響することがこれまでの実験を通して判った。低水路内の二次流セルの規模を数値的に把握するには、三次元の基礎式を用いた解析が不可欠であるが、ここでは樹木の配置及び配列、水路の形状をパラメータとして平面的な流れの影響を見ることを目的とし数値解析を行った。ここで樹木群の扱いについては抵抗係とみなし、透過係数を用いて抵抗項を与えるものとした。

##### (1) 基礎式

数値解析の基礎式は以下の通りである。

<運動方程式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y}$$

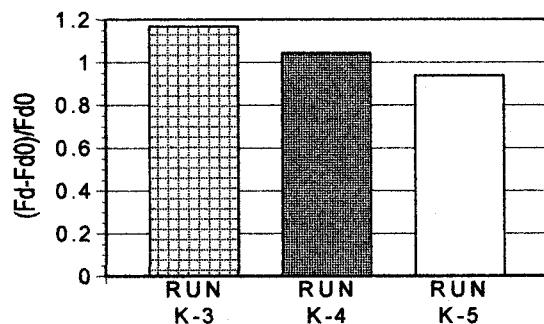


図-12 抗力

$$= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{g}{k^2} M \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{g}{k^2} N \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

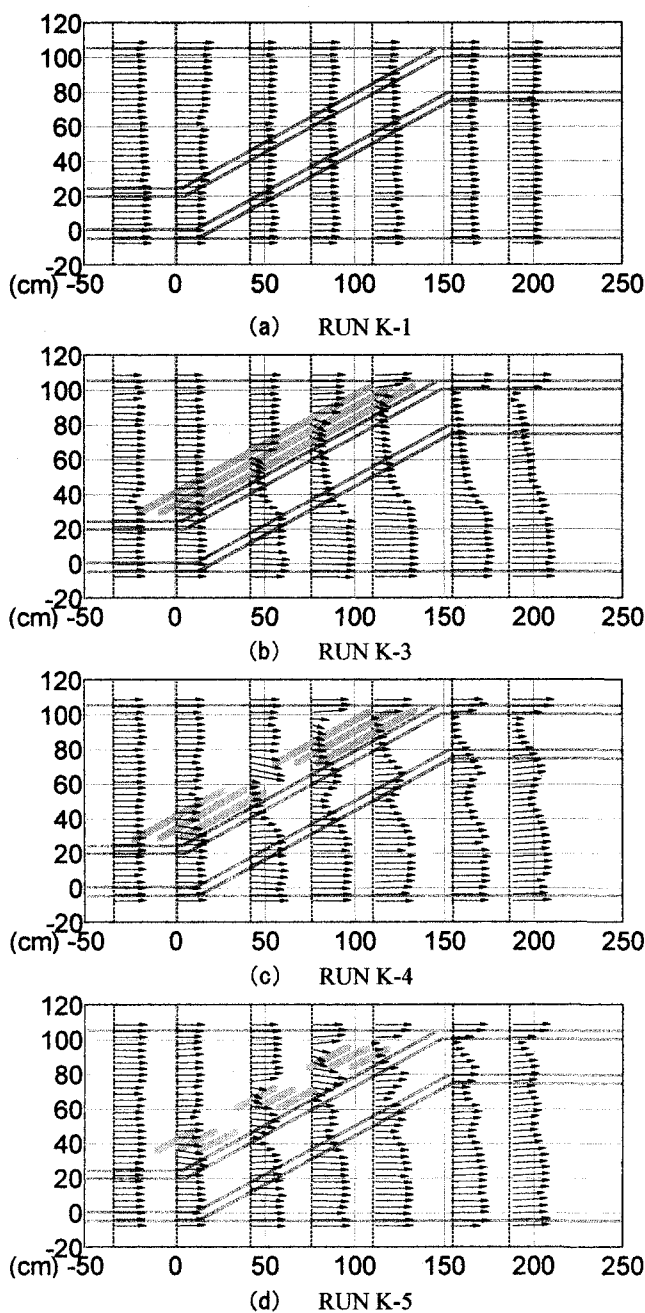


図-13 平面流速分布図 (計算値)

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $u, v$ :  $x$ 方向、 $y$ 方向の平均流速、 $M, N$ :  $x$ 方向、 $y$ 方向の流量フラックス、 $h, H$ : 水深、水位、 $\varepsilon$ : 渦動粘性係数である。  $k$ は樹木群の透過係数で次式により与えた。

$$k = \frac{1}{\sqrt{C_D a_w / 2g}} \quad (4)$$

ここに、 $a_w$ : 単位体積の流体塊中にある樹木群の流下方向への総投影面積、 $C_D$ : 樹木群の抗力係数である。本実験の円柱群では、 $a_w = 37.2$ であり、また、実験から求めた抗力係数は、 $C_D = 0.35$ であるから、 $k = 1.23$ と

なる。

## (2) 計算ケース

数値解析用の水路モデルは、横断方向を2.5cm、流下方向に4.33cmの直交座標系による長方形メッシュに分割したものである。実験で円柱群を設置した箇所に相当するメッシュに対しては透過係数を定め、計算値と実験データとの平面的な流況の比較のため流速分布を求めた。従って計算ケースは実験ケースの内、RUN K-1、RUN K-3～RUN K-5が対象となる。

## (3) 計算結果

各ケースを対象とした流速の平面分布を図-13に示す。RUN K-1と比較すると、各ケースとも円柱群の切れ目を通して速い流れが生じ、これらが斜行方向ではなく水路の下流側に向かって強い直進性を示していることが判る。これは実験で得られた結果と傾向的には一致している。但し、流れが水深方向に平均化されているため、実験結果のように低水路内で発生している局所的な高速流などは表現し得ない。

## 5. おわりに

本実験では樹木群の配置及び配列を変えることで流れに及ぼす影響を検討したが、斜行部に一樣に樹木群が繁茂した場合に較べ、その一部が間伐採や洪水流によって流失した場合は斜行部内での二次流セルの規模が小さくなることで、二次流の発達による河床の洗掘に対する恐れは小さい。従って、実際の河道計画においては樹木群が一樣に繁茂した場合を想定しておけばよいと言える。その際には堤脚沿いに生じる速い流れの特性や、樹木群の無い箇所の低水路部での流れの特性を考慮して、何らかの処置を施す必要がある。

また、樹木群の表現については今回の数値解析では抵抗体として扱うことによりある程度表現し得たものの、実際に樹木群が河積を阻害していることは見込まれていない。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二、渡辺明英、高次渉、坂本博紀：低水路沿い樹木群の密度変化による流れの混合と発達過程、水工学論文集第45巻、pp.859-864,2001
- 2) 西村賢、本溜博理、浦山剛史、福井吉孝：斜行部を有する複断面開水路の流れ、水工学論文集第45巻、pp.871-876,2001
- 3) 浦山剛史、福井吉孝：斜行部を有する複断面開水路における植生の影響、土木学会第55回年次学術講演会概要集、II-125,2001
- 4) 石垣泰輔、武藤裕則：河床形状と高水敷粗度が複断面蛇行流れの構造に及ぼす影響について、応用力学論文集 vol3, pp.821-828,2000
- 5) 財団法人リバーフロント整備センター編、河川における樹木管理の手引き、山海堂,1999

(2001. 10. 1受付)