



## 側岸に透過性構造物のある開水路流における横方向流速分布

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 多田, 博登 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007795">https://doi.org/10.24729/00007795</a>

## 側岸に透過性構造物のある開水路流における 横方向流速分布

多田博登\*

Lateral Distribution of Open Channel Flow Velocity  
with Permeable Structures near the Side Wall

Hiroto TADA\*

### ABSTRACT

The periodical exchange of water between the main flow region and the permeable region results in the small grade of velocity distribution and the large resistance of flow. It is considered that these results are equivalent to the increase of roughness of the side wall and the decrease of the channel width. This paper shows the method of to lead the form of lateral distribution of velocity from the momentum equation and Reynolds equation.

It is found that the calculated results agree with experimental results if a suitable location of the origin of the distribution and a value of the permeable structures roughness are substituted, and the origin is in the main flow.

Key Words: Open channel flow, Lateral distribution of velocity, Permeable structures, Reynolds Stress

### 1. はじめに

近年、河川抽水域のヨシのような植生が微生物や小さい水生生物の生息にとって非常に重要であり、これら動物の作用も含めて河川の浄化作用の大きな部分がまかなわれていることが知られてきた。<sup>1) 2)</sup> 一方植生は流れの抵抗を増加させるため、ダメージポテンシャルの急増する現在治水的にはあまり芳しくない影響を与えると捉えられている。その得失を述べるためには植生と流れの関係を正確に知ることが急務であり、多くの研究者<sup>3) 4)</sup>によって種々のアプローチが試みられてきたが、明確な抵抗を述べるには至っていない。

筆者らは比較的小さい流量時における植生による流れの抵抗を把握することを目的として、特に抽水域に繁茂するヨシを対象とする植生モデルとして、植生帯の持つ種々の特性中最も基本的な透過性のみを持つ構造物に単純化し、これが側岸近傍に存在する場合の流れの流速分布について実験研究を行ってきた。

透過性構造物周辺の流れの特性として、Chu and Gelhar<sup>5)</sup>は構造物の内部流れと外部流れの流速分布は連続的になっていてスリップ速度が存在すること、流速分布の原点は空隙内にあることを示した。Nezu<sup>6)</sup>は流速分布は乱流の対数則に従うがカルマン定数が空隙率の増加とともに減少することを実験によって確認されたと述べている。

一方福岡ら<sup>7)</sup>は内部から外部へ低速水塊の噴出と逆方向の高速水塊の流入が交互に起こることによって周期的な水塊の交換があり、これが流れの抵抗に影響することを報告している。これはスリップ速度は噴出時の層流と流入時の乱流の両者によって形成されることを示しており、領域境界付近の流れは完全乱流ではなく、間欠的な乱流であると解釈できる。それならスリップ速度は平均的には主流域の乱流による誘導流速であると捉えるのが合理的であり、対数流速分布の原点はむしろ主流域に存在するのではないかと考えた。

本研究は主流域流速分布に対数則を適用し、透過性構造物の影響を相当粗度と原点の位置の移動として考え、運動量およびレイノルズ方程式の適当な仮定から流速最大値の生じる位置を求め、流速、河床せん断力、およびレイノルズ応力分布を導き、実験値と比較することによって流速分布の原点位置を確認した。

1994年4月11日受理

\* 建設工学科

\* Department of Civil Engineering

2. レイノルズ応力分布モデル

2-1. 理論

対象とする開水路の流れは、図-1に示すように河床勾配I、幅Bの矩形断面水路で、側壁1は植生に相当する粗度を持つとして粗度の値は対岸の側壁2および河床のそれに比べて大きいとする。流れは完全乱流の等流であり、局所平均流速はx方向のuのみ存在し、uの鉛直方向分布は河床粗度が小さいとして、河床ごく近傍を除き深さの相違による流速値の相違は小さいが、uの横方向分布は側壁1の大きな粗度のため変化が顕著である。そのため河床せん断力 $\tau_b$ は横方向流速分布に対応して分布するが、側壁せん断力 $\tau_1$ および $\tau_2$ は鉛直方向流速分布がほぼ一樣であることに対応して、深さ方向に一定であると考えことにする。

いま鉛直方向および横方向流速分布はそれぞれ関数形 $\phi$ を用いて下のように表わされるとする。

$$u/(\tau_b/\rho)^{1/2} = \phi(z/ks_b) \dots\dots\dots(1)$$

$$u/(\tau_j/\rho)^{1/2} = \phi(y_j/ks_j); (0 < y_j < y_j^*) \dots\dots(2)$$

ここに、u : x方向流速、 $\tau$  : 壁面せん断力、ks : 壁面相当粗度、 $\rho$  : 水の密度、および添え字b、1および2は河床、側壁1および2におけるものを表す。また添え字jは、側壁の1および2を表すことにする。

水深に比較し水路幅があまり大きくなく、両側壁せん断力 $\tau_j$ の影響が相互に及ぶ場合、すなわち横方向流速分布において最大流速が一方所( $y_j = y_j^*$ )で生じている場合(これを狭幅であるとする)、

$$y^*_1 + y^*_2 = B \dots\dots\dots(3)$$

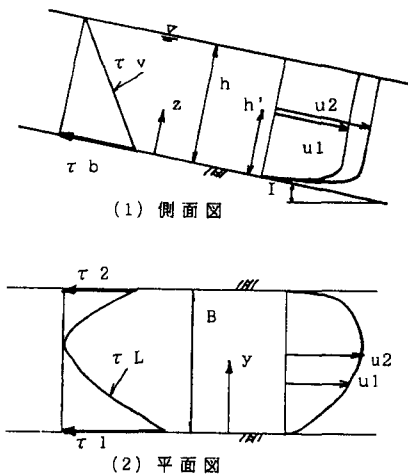


図-1 対象水路の水力条件

であり、一方側壁粗度の影響が相互に伝わらない場合(広幅とする)は、

$$y^*_1 + y^*_2 < B \dots\dots\dots(4)$$

となる。このとき  $y^*_1 \leq y_1 \leq B - y^*_2$  の範囲で、u(および $\tau_b$ )は一定であると考えられる。すなわちここでは添え字を $k = 1$ または2として、

$$u = (\tau_k/\rho)^{1/2} \phi(y_k/ks_k) \dots\dots\dots(5)$$

以上式(1)、(2)より、河床せん断力は下のように表される。

$$\tau_b/\rho = (\tau_j/\rho) \phi(y_j/ks_j)/K_b; (0 < y_j < y_j^*) \dots\dots\dots(6)$$

$$\tau_b/\rho = (\tau_k/\rho) \phi(y^*_k/ks_k)/K_b; (y^*_1 < y_j < B - y^*_2) \dots\dots\dots(6')$$

式(6')は広幅で流速一定の領域における河床せん断力である。式中、

$$\phi(x) = \{\phi(x)\}^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$K_b = \phi(h'/ks_b) \dots\dots\dots(8)$$

である。ここに、 $z = h'$  でuを測定したとする。運動量方程式を図-1の流れに適用すると、

$$\int_0^B \tau_b dy + (\tau_1 + \tau_2)h = \rho g B I \dots\dots\dots(9)$$

ここで、

$$\Phi_j(y) = \int_0^y \phi(y/ks_j) dy \dots\dots\dots(10)$$

と置くと、

$$\int_0^B \tau_b dy = \sum \{ \tau_j \Phi_j(y^*_j) \} / K_b + (B - y^*_1 - y^*_2) \tau_k \phi(y^*_k/ks_k) / K_b \dots\dots(11)$$

上式中、シグマはj = 1と2を加えるものとする。式(9)に代入すると、

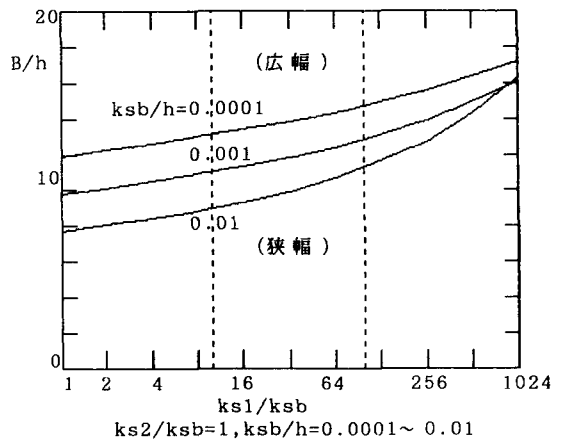


図-2 広幅と狭幅の境界

$$\Sigma \{1+\Phi_j(y^*_j)/hK_b\} \tau_j + (B-y^*_1-y^*_2) \tau_k \phi(y^*_k/ks_k)/K_b = \rho g B l \dots (12)$$

狭幅の場合は上式左辺第2項は0である。

レイノルズ方程式において、流れは等流、水深は幅に比べて小さいことを考慮すると、x方向の方程式は下のようなのである。

$$0 = \rho g l + \partial \tau_L / \partial y + \partial \tau_v / \partial z \dots (13)$$

ここに、 $\tau_L$ および $\tau_v$ はx方向の鉛直および水平内部せん断力であり、粘性応力は乱流応力(レイノルズ応力)に比べて十分小さいと考えれば、

$$\tau_L = -\rho \bar{u} \bar{v}, \tau_v = -\rho \bar{u} \bar{w} \dots (14), (15)$$

いま2次元流れにおいてよく観測されている $\tau_v$ の三角形分布がこの流れに対しても適用できると仮定すると(図-1参),

$$\tau_v = \tau_b (1-z/h) \dots (16)$$

よってz方向勾配は、

$$\partial \tau_v / \partial z = -\tau_b / h \dots (17)$$

式(13)に代入し、また $\tau_L$ はyのみの関数であるから、

$$d\tau_L / dy = -\rho g l + \tau_b / h \dots (18)$$

式(6)を代入して積分すれば、

$$\tau_L = \tau_b \{1+F_j(y_j)\} - \rho g l y_j; (0 < y_j < y^*_j) \dots (19)$$

よって $\tau_L$ の分布が得られる。また狭幅の場合は $y_j = y^*_j, j=1, 2$ において、広幅の場合は $y^*_1 < y_1 < B - y^*_2$ の区間において

$$\tau_L = 0 \dots (20)$$

となる。ここに関数Fは下式である。

$$F_j(y_j) = \Phi_j(y_j) / hK_b \dots (21)$$

以上から、最大流速発生位置 $y^*_j$ は式(5)、(20)および(12)をまとめて、狭幅の場合は、 $y^*_2 = B - y^*_1$ と書いて、

$$y^*_1 \phi(y^*_1/ks_1) / \{1+F_1(y^*_1)\} = (1-y^*_1) \phi\{(B-y^*_1)/ks_2\} / \{1+F_2(y^*_2)\} \dots (22)$$

広幅の場合は、

$$y^*_1 \phi(y^*_1/ks_1) / \{1+F_1(y^*_1)\} = y^*_2 \phi(y^*_2/ks_2) / \{1+F_2(y^*_2)\} = K_b / \theta \dots (23)$$

ここに、

$$\theta = B/h \dots (24)$$

である。 $y^*_1$ および $y^*_1$ と $y^*_2$ に関する式(22)および式(23)は解析的に解くことはできず、数値解析によらなければならない。このとき、関数形 $\phi$ の式形と式(24)の $\theta$ の値を与えなければならない他に、次のパラメーターの値も必要である。

$$\beta = ks_b / h, \gamma_j = ks_j / ks_b \dots (25), (26)$$

以上の条件の元に適当な数値計算法を用いて、位置に関する無次元量 $t^*_j (=y^*_j/B)$ の値が計算でき、更に側壁せん断力 $\tau_j$ は下式によって、

$$\tau_j = \rho g l y^*_j / \{1+F_j(y^*_j)\} \dots (27)$$

河床せん断力分布は式(6)、および流速分布は式(2)によって得られる。

渦動粘性係数 $\epsilon$ を式(28)によって定義すると、 $\epsilon$ のy方向分布は式(29)および(30)のように表される。

$$\tau_L = \epsilon \rho du/dy \dots (28)$$

$$\epsilon = \kappa y_j [(\tau_j / \rho)^{1/2} \{1+F_j(y_j)\} - g l y_j / (\tau_j / \rho)^{1/2}] ; (0 < y_j < y^*_j) \dots (29)$$

狭幅の場合は $y_j = y^*_j$ において、および広幅の場合は $y^*_1 \leq y_1 \leq B - y^*_2$ の区間において、

$$\epsilon = 0 \dots (30)$$

である。

横断方向流速分布形、内部せん断力分布形およびそ

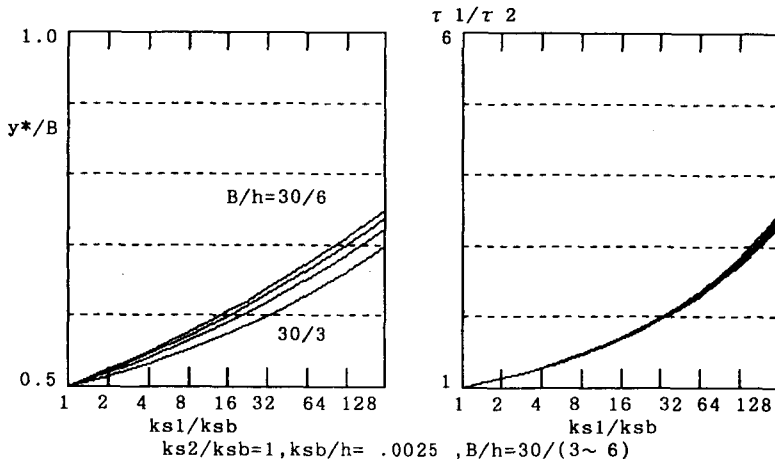


図-3 最大流量の生じる位置

の他の値に関する数値計算の方法と、計算結果の例を示す。

流速分布を与える関数形 $\phi$ は、乱流において普遍的に用いられる次式の対数則が適用できると考える。

$$\phi(y/ks) = A + (1/\kappa) \log(y/ks) \dots\dots\dots(31)$$

ここに、 $\kappa$ ：カルマン定数、 $A$ ：定数である。これを用いると関数形 $\Phi$ は、

$$\Phi(y) = (1/\kappa^2) [a + \log(y/ks) \{b + \log(y/ks)\}] \dots\dots\dots(32)$$

ここに、 $a, b$ ：定数である。数値計算においてはこれらの定数の値として、

$$\kappa = 0.4, A = 8.5 \dots\dots\dots(33), (34)$$

を用いることができよう。これより、 $a = 6.76, b = 4.8$ となる。

水路が広幅か狭幅かの判定は定式化が難しいが、数値計算においては簡単に判別できる。まず狭幅であると仮定して式(22)を用い $y^*_1$ を求め、その結果得られた $\tau_1$ が $0 < y_1 < y^*_1$  区間において正か0であれば $(d\tau_1/dy_1 | y_1 = y^*_1) < 0$ と考えれば良い) 仮定が正しいから狭幅であり、負であれば $(d\tau_1/dy_1 | y_1 = y^*_1) > 0$  広幅となるから新たに式(23)によって $y^*_1$ と $y^*_2$ を求めことにすればよい。

各パラメータの変化にともなう広幅と狭幅との境界値に関するシミュレーション結果の例を図-2に示す。図は $\gamma_2 = 1$ の場合、 $\beta$ をパラメータとして $\gamma_1$ の相違による境界値の変化を示している。境界の値はアスペクト比によって与えており、各曲線より上部が広幅である。図から分かるように、一般に側壁1の粗度が河床粗度に比べて大きいほど、また水深に比べ河床粗度が小さいほど境界となるアスペクト比の値は大きくなる。

また側壁粗度が小さいうち( $\gamma_1 < 約400$ )は水深に比べて河床粗度が小さいほど境界は大きくなるが、側壁粗度が大きくなると( $\gamma_1 > 約400$ )逆に小さくなるようである。

狭幅の水路の場合、最大流速の生じる無次元位置 $t^* = y^*_1/B$  およびせん断力比 $\tau_1/\tau_2$ の諸パラメータとの関係を図-3に示す。図から分かるように $t^*$ は $\gamma_1 = 1$ のときは水路中央すなわち $t^* = 0.5$ にあるが、 $\gamma_1$ の増加にともない大きくなって対岸側壁2方向に偏る。その程度はアスペクト比 $\theta$ が小さいほどまた水深に比較して河床粗度が小さいほど大きいようである。またせん断力比の変化も $t^*$ と同様の傾向を示す。

式(24)、(25)および(26)に示すパラメータの値を任意に選択して、まず $y^*_1$ または $y^*_1$ と $y^*_2$ を計算し、次いで $\tau_1/\tau_2$ 、 $\tau_2/\tau_1$ 、および $u/\bar{u}$ の $y$ 方向分布、および $y^*_1/B$ 、 $\tau_1/\rho ghI$ 、 $\bar{u}/(ghI)^{1/2}$ の値を求める計算プログラムが作成できる。それによる結果の例を図-4(1)、(2)に示す。図では河床と側壁2は同一材料で作成されていることを想定し、 $ks_2/ks_0 = 1$ としている。断面平均流速 $\bar{u}$ は、式(2)を $y$ に関し $0 \sim B$ で積分して下のように得られる。

$$\begin{aligned} \bar{u}/(ghI)^{1/2} = & \sum (\tau_1/\rho ghI)^{1/2} \{6 \\ & + 2.5 \log(\alpha_1 \cdot t^*_1)\} t^*_1 \\ & + (\tau_2/\rho ghI)^{1/2} \{8.5 + \\ & 2.5 \log(\alpha_2 \cdot t^*_2)\} (1 - t^*_1 - t^*_2) \dots\dots(35) \end{aligned}$$

ここに、

$$\alpha_i = \theta / \gamma_i \beta \dots\dots\dots(36)$$

図(1)は狭幅の場合であり側壁1の大きな粗度の影響範囲が大きく、最大流速の生じる位置が対岸に大きく偏っていることが表されている。図(2)は側壁1の粗度の影響が対岸の粗度の影響と相互作用せず一定流速の領域が見られる。側壁粗度が河床のそれと同程度である場合は、流れ場の大部分がこの領域によって占められるものであると考えられる。図(1)に示した例は、植生帯のような透過性構造物が側壁付近に存在するため相当粗度が非常に大きい場合に該当すると考えられる。

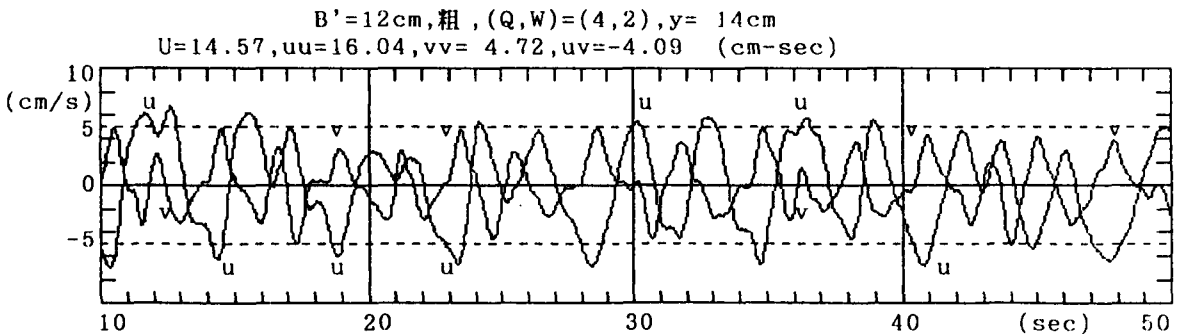


図-4 u, v観測データ

3. 植生モデルによる実験と理論の検討

3-1. 実験条件・方法

長さ9m, 幅30cmのエンビ製矩形断面水平床の水路の右岸側壁に添って透過性構造物モデルを設置し, 所定の流量と下流端の堰高によって通水して, 各測点の流速と各断面の水深を計測した. 水路右岸側壁に沿って流れ方向をx軸, 右岸から左岸方向をy軸, および河床面から垂直上方をz軸とし, それぞれ方向の局所瞬間流速をu, v, およびwとする. 流速の観測は2方向電磁流速計(ケネックス社製)を用い, 測点は下流端より4m付近断面において河床から2cmの高さで水路幅方向は透過性構造物外縁より2cm外から対岸側壁より2cm手前側の主流域において1cm間隔とした. x, y 2方向の流速出力は電圧値として刻み時間0.05秒で90秒間, 計1800個のデータをAD変換ボードからパソコンに取り込み, データファイルとしてフロッピーディスクに記録する. 後に流速値に変換, また実験時の流速計の設置誤差の修正等を実施し新たに流速のデータとして記録した. 水深はデジタルポイントゲージ(同上)により適当な4断面で計測した.

流量は水路上流端の三角堰によって所定値を与える. 水路下流端は水深調節用で, 種々の高さで作成したエンビ製全幅堰である. 流量と下流端堰高によって水力条件を決定することができる. 流量は2~4 l/sec, 堰高は0~4 cmの範囲を実験ケースとした.

透過性構造物模型として河川抽水域のヨシを考慮し, 直径3.8mmの丸釘を一定面積に等密度で河床上に垂直に立てたものとした. 密度は1および0.5本/cm<sup>2</sup>の2ケース(それぞれ密および粗とする), 釘の植生域の形状は, 植生域の幅の影響と植生域と主流域の境界の形状の影響を知るため, 一定幅のもの5ケース(植生幅: B'=12, 10, 8, 7.5, および6cm), 鋸形状のもの2

粗) (密)

(粗)

(密)

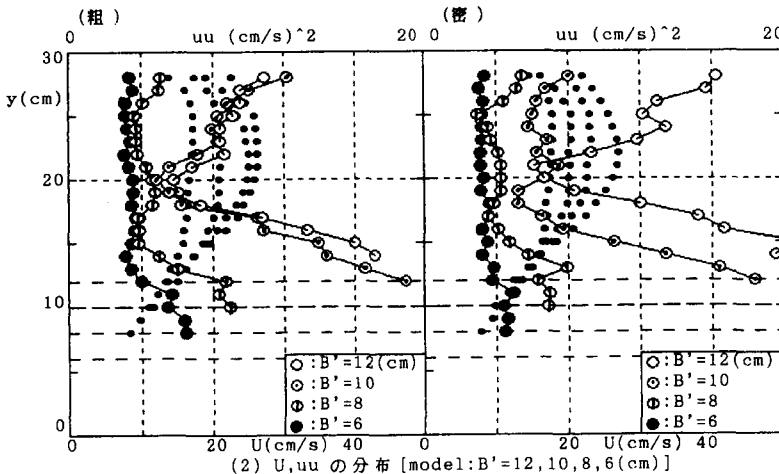
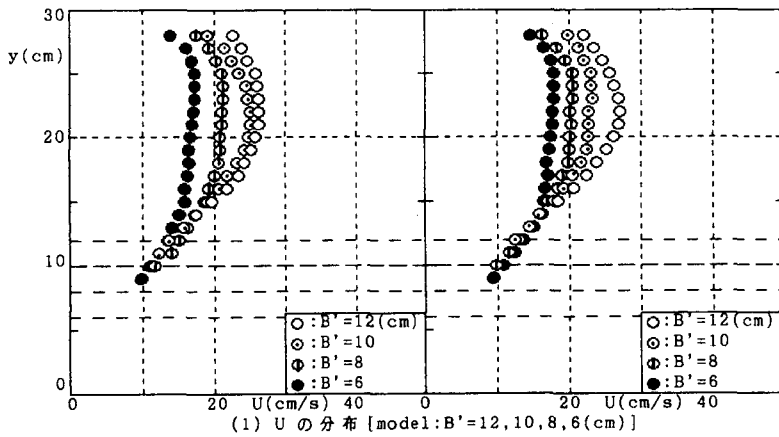


図-5 分布図(一定幅モデル)

ケース（山部の幅10cm, 谷部の幅5cm, 波長は5cmおよび10cm）を採用した。

3-2. 実験結果

図-4に変動流速 $u'$ と $v$  ( $=v'$ )の計測結果, および $u$ の平均値 $U$ , それぞれの強度, および両者の相関(レイノルズ応力)の値を示す. 測点は植生域に近く $u'$ と $v$ の間に明らかな負の相関が見られる. ただし2方向電磁流速計センサー部は直径1cmの円筒形であり, 正確には点計測とは言えないから, 相関値=レイノルズ応力と表すには誤差があると思われる.

図-5は植生幅4ケースにおける, (1)局所平均流速, (2) $u$ の乱流強度, (3) $v$ の乱流強度, および(4)相関値のそれぞれ $y$ 方向の分布を植生密度粗と密を対

比して示している. 図の(1)から, 植生幅が大きいほどまた植生が密であるほど流速値は大きく, また分布形状は植生幅の大きいほど前章で示した狭幅のように最大流速の生じる点が植生の対岸側に片寄った位置に明瞭に現れているが, 植生幅が小さくなるとその点が不明瞭になり一定流速の生じる区間が見られるようになることが分かる. 図(2)は, 狭幅水路であるほど植生域との境界付近の乱流強度が大きいことが示されていて, 周期的な $u$ の変動が大きいことが分かる. またこの時対岸側も大きくなっていて, 植生側の $u$ の変動と同様な周期性がみられる. 図(3)から $v$ の乱流強度は植生域との境界に近いほど大きい, 狭幅であるほど主流域中央部に寄っていることが分かる. 図(4)は実験値のばらつき目立つものの, レイノルズ応力は両領域の境界に近いほど大きく, また対岸側に行くに従

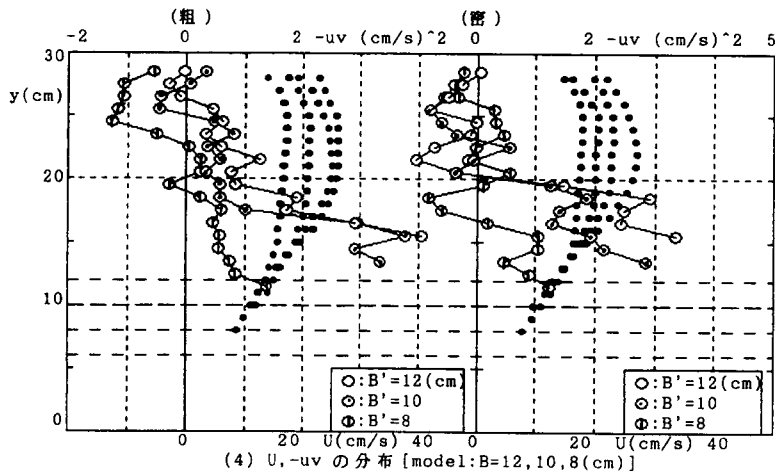
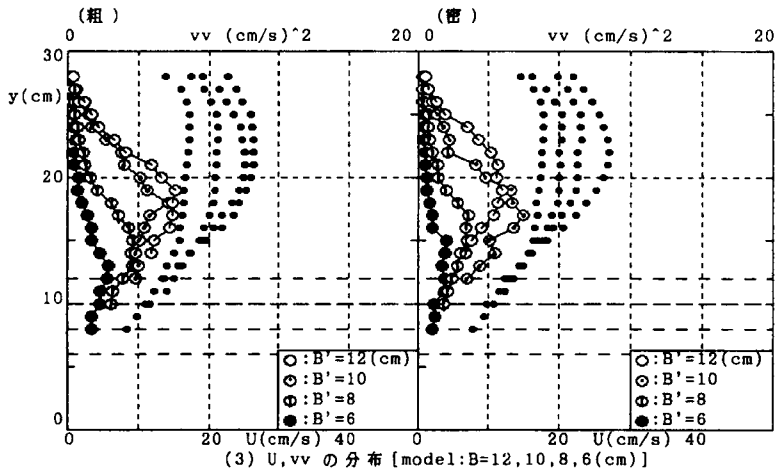


図-5 分布図(一定幅モデル)

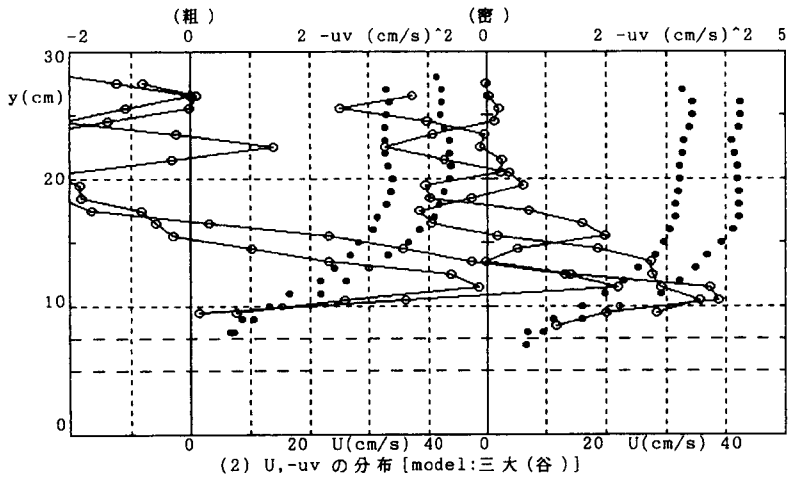
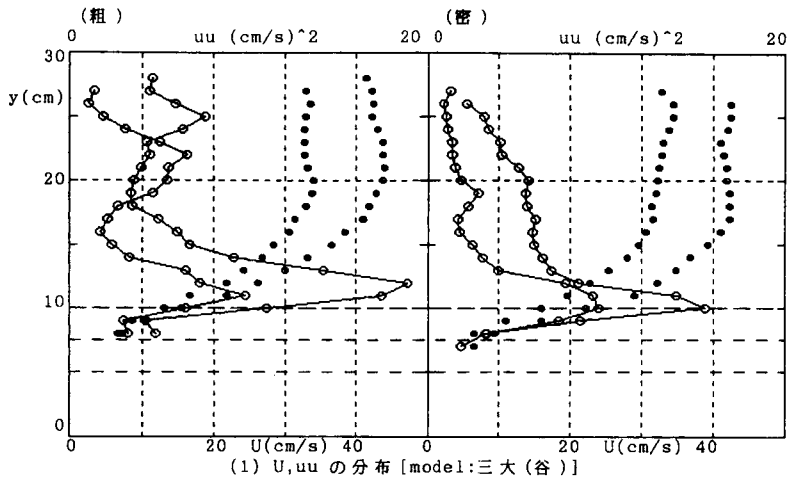


図-6 分布図(三角形モデル)

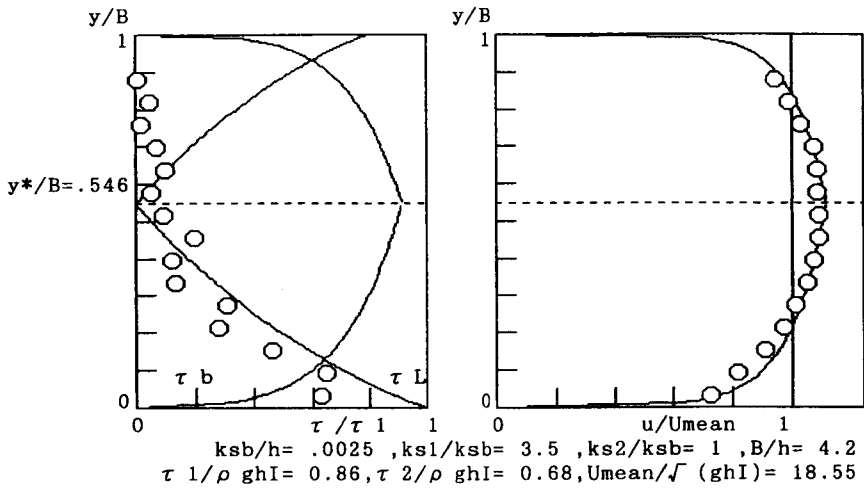


図-7 計算値と実験値の比較



って再度大きくなるが前者より小さくなっていることが分かる。

図-6は三角形分布の植生域の、谷となっている断面における速度相関の分布を示すが、山の位置(y=10cm)より外側でレイノルズ応力は最大になりそれより内側に行くほど小さくなっていて、この領域は主流域の乱流とは異なる流れであることが予想できる。

3-3. 流速分布の検討

第2章で述べた流速分布を実験結果に当てはめるとき、水路幅B、およびksの値をどのようにとればよいかが問題であり、これに対する理論的アプローチは困難である。本研究では実験値の数値計算によるBとksの推定を試みた。方法は以下のものである。

まず適当なBの値を仮定し、実験値hを用いてB/hおよび実験では河床と側壁は同一材料であることによりks2/ks0=1の値を代入して、図-3により流速分布から得られるy\*/Bの値によって、ks1/ks0とks0/hの値の組み合わせと、それに対応するτ1/ρghIの値を知る。

次に速度欠損則を利用し、植生側の流速分布実験値に最小自乗法を適用することを考える。乱流流速分布の対数則の原点をy=y0とすると、

$$y_0 = \{y^*([X_i y_i] + [y_i] - y^*[X_i]) - [y_i^2]\} / \{y^*(n - [X_i]) - [y_i]\} \dots\dots\dots(37)$$

ここに、

$$X_i = \exp\{\kappa/U^*(u_i - u_{max})\} \dots\dots\dots(38)$$

またumax: y=y\*で生じるuの最大値、i=1~n、およびU\*²=τ1/ρである。これによってκ/U\*とy0の組み合わせの値を知ることができる。以上から、B/h、ks1/ks0、ks0/h、およびU\*の推定値が求められた。

図-7は流速およびレイノルズ応力の分布の前章による計算値と実験値の比較を示しており、特に流速分布は両者よく一致していることが分かる。

計算結果から、乱流流速分布の原点はいずれのケースも主流域中に存在することが推定された。これは従来スリップ速度の存在から原点は透過性構造物内にあると推定されていることと異なるが、実際レイノルズ応力分布が植生外縁より主流域側にあることから、スリップ速度はむしろ乱流による誘導流速であると解釈できる。ks1/ks0の計算結果は、植生モデルの密度と幅や形状が等しくても水理条件によって異なるので、本研究の実験は完全乱流の範囲にはないため複雑な結果になっている。

4. おわりに

本研究において、まず河川抽水域植生帯の流れに及ぼす影響は、透過性構造物と流れの相互作用として捉えれば、水理学的には水路幅の減少と大きな相当粗度の存在によって表すことができると考えた。主流域における巨視的な運動量のつりあいと、レイノルズ方程式におけるレイノルズ応力分布の流速分布との関係を構築して、これによって最大流速の生じる位置が求められることを示し、主流域における流速、河床せん断力およびレイノルズ応力の分布形が与えられた。

以上の結果と実験を比較することにより、植生によって減少した水路幅と植生の相当粗度の適当な値を用いれば、流速分布を正確に見積もることができると分かった。このとき乱流流速分布の原点は主流域内に存在することになり、スリップ速度は乱流による誘導流速であると解釈できる。植生の相当粗度値は透過性構造物の密度や平面形状だけでなく水理条件にも関係し、本研究では値を特定することが困難であった。

最後に本研究は、河川環境財団の研究費補助(代表者:大阪大学・村岡浩爾教授)と同教授の貴重な助言を賜った。記して謝意を表します。また実験および解析において本校卒業研究生の大きな助力を得たことを感謝します。

参考文献

- 1) 細見正明他: アシ原の自然浄化機能を活用した生活雑廃水処理, 国立公害研究所研究報告第119号, pp. 7-17, 1988
- 2) 細川恭史他: 沿岸部干潟におけるヨシ原の機能とヨシを利用した汚濁の浄化の可能性について, 第15回環境問題シンポジウム講演論文集, pp. 54-59, 1987
- 3) 福岡捷二・藤田光一: 洪水流の横方向流速差がもたらす付加的抵抗の評価, 第33回水理講演会論文集, 1989
- 4) 室田明・福原輝幸: 直立性植物を有する開水路流れの構造について, 第28回水理講演会論文集, 1985
- 5) Chu, Y. H., and Gelhar, L. W. (1972). "Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries." Reprt No. 148, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resour. and Hydrodynamics, Dipt. of Civ. Engrg., Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, Mass.
- 6) Nezu, J. O. (1975). Turbulence. 2nd Ed., McGraw-Hill Inc., New York, N. Y.
- 7) 福岡・藤田: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 建設省土木研究所報告, No. 180-3, 1990