

植生群落間の相互作用が開水路流れの抵抗に与える影響

Influence of interaction between longitudinal vegetation zones on flow resistance in an open-channel

田中貴幸*・大本照憲**・田中寿幸***

Takayuki Tanaka, Terunori Ohmoto and Toshiyuki Tanaka

*工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

**工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (同上)

***熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

Hydraulic engineers working on river restoration have been requested to grasp a profound understanding of natural streams as a complex and dynamic system, which involves not only physical elements but biological components. From this viewpoint, the role of riverine vegetation upon river dynamics and flow conditions becomes essential. Vegetation communities are often observed to grow in stripe pattern or patches within many stream channel. In this paper, the influence that interaction of longitudinal vegetation zones gave to the flow resistance in an open-channel was examined experimentally. Laboratory experiments were conducted using a two-component electromagnetic current-meter and a particle-image-velocimetry (PIV) to clarify the momentum transport between main flow and flexible artificial vegetation. Results showed that the flow resistance significantly depended on the lateral distance between longitudinal vegetation zones and the reason could be explained by the difference of momentum transport through the interaction between longitudinal vegetation zones.

Key Words: vegetation, flow resistance, flow structure, momentum transport, PIV

1. はじめに

河道設計を行う上で、豊かな河川環境を創出することを目的とした多自然型川づくりが盛んに行われており、その中で植生や樹木は生物の生息・生育空間、景観など河川環境の形成において大きな役割を果たしている。一方で、植生群落は洪水疎通能の低下や砂州の台地化といった影響を及ぼすことから、適切な植生管理が求められる。そこで、治水や環境機能を高めるためには、植生群落を伴う流れに対する抵抗特性や流動機構について把握することが重要となる。

植生群落を伴う開水路流れの構造に関する研究はこれまでに多数行われている。辻本ら¹⁾は側岸部に植生を有する開水路流れの横断混合機構に関して、水面変動・流速変動は低周波で比較的規則正しくほぼ混合域での平均流速程度で移流されることを指摘した。また、大本ら^{2,4)}は水路中央に植生帯を設置し、植生帯上に越流がある場合には、植生帯周辺の主流部の底面付近から植生域へ流入、水面付近から流出する運動形態の二次流が存在し、乱流構造に与える影響の大きいことを指摘した。さらに、植生帯上層が非越流の場合には、植生帯両側に発生した水面変動は質量や運動量輸送を促進する流動性の高い波であることを明らかにした。そして、水面変動と横断方向の流速変動と

の相互関係から、植生帯の両境界が法線方向の流速成分を許容するために、横断方向流速が強まることを予想した。

このように、水路側岸部および中央部に植生帯が配置された開水路流れにおける流動機構に関しては多くの知見が得られている。また、植生群や樹木群の配置が流れの抵抗特性に与える影響を検討した研究として、富永ら⁵⁾は配置と配置幅を変化させた高水敷樹木群を有する複断面開水路の抵抗と平均流速分布特性を実験的に検討し、樹木群が洪水流に及ぼす影響について明らかにした。大本ら⁶⁾は単断面開水路流れにおいて、植生群落の配置の違いによる流れの抵抗特性を把握し、各配置における水面変動や運動量輸送特性といった流動機構について検討を行った。その結果、水路中央1列および2列配置といった植生帯を横断する流れを両境界で許容するような植生帯の配置では、河岸や両岸に配置する場合に比べ抵抗が大きくなることを明らかにした。ここで、流れの抵抗が最も大きくなった中央2列配置では、植生帯を横断する流れが植生帯間において相互に作用することが予想され、水面変動、二次流および流速変動といった流動機構に大きな影響を及ぼすのではないかと考えられる。

このように植生帯を横断する流れが植生帯間で相互に作用するような境界条件において、詳細な流動機構についての検討や、植生帯間の相互作用がどのような植生帯

表-1 実験条件

水路中央側における植生帯境界間の距離 B_c (cm)	水路勾配 I		植生帯高さ H_v (cm)	植生材料	植生直径 d (mm)	植生幅 B_v (cm)
	1/500	1/300				
	流量 Q (l/s)	流量 Q (l/s)				
0~30	4, 5	5, 6	7.5	ナイロン糸	0.242	10

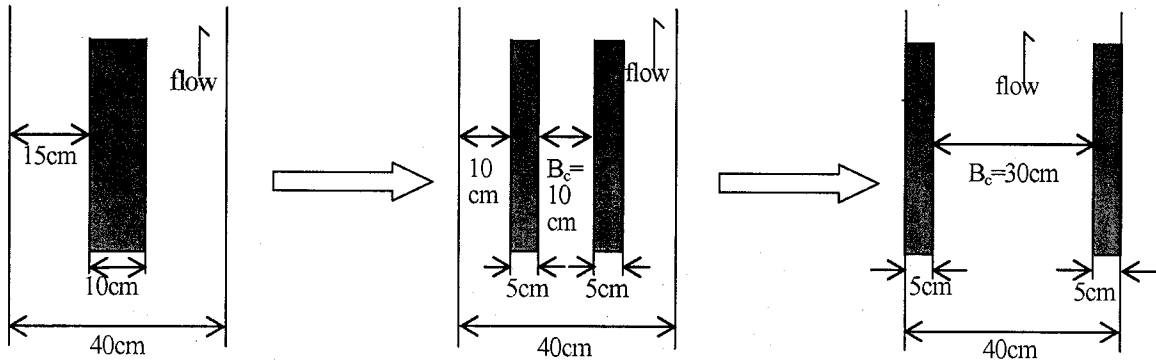


図-1 実験水路概要

間隔において強まるのかといった検討はこれまでほとんどなされていない。そこで本研究では、植生帯を横断方向に対称性を有するように2列に配置し、その植生帯間の距離を変化させることで、植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性および流動機構の検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験は全長 10m, 幅 $B=40$ cm, 高さ 20cm のアクリル樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯の模型にはプラスチック板に水流の流れに追従して撓む 6.10 ナイロンブリュスル (直径 0.242mm, 曲げ剛性 $EI=1.45 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$) を 7.5cm の高さに揃え、0.5cm 間隔で貼り付けたものを模擬植生帯とした。模擬植生帯は水路上流端より 100cm の位置から 840cm に渡って配置した。図-1 のように植生帯間の距離を $B_c=0 \sim 30$ cm で横断方向に対称性を有するように変化させていく。植生帯間の距離が $B_c=0$ cm の場合は水路中央 1 列に、 $B_c=30$ cm の場合は水路両岸に植生帯を配置している状態を表す。それ以外の植生帯間隔については非植生域と植生域の接触面積は同様である。また、植生幅は $B_v=10$ cm とし、いずれのケースも植生域と非植生域の割合は同様である。座標系は植生帯先端の水路中央を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直方向に z 軸をとり右手系とする。また、それぞれの流速成分を u, v, w , 平均値を U, V, W , 変動成分を u', v', w' と表す。実験条件を表-1 のように設定する。水路勾配 $I=1/500$ では流量 $Q=4$ および 5 l/s, $I=1/300$ では $Q=5$ および 6 l/s と設定し、この条件下で植生帯間の距離を変化させ、ポイントゲージを用いて水深を計測する。本実験では水路に対して植生帯の流下方向長さを長めにとり、さらに水路下流端のせきを用い下流端の影響を極力小さくすることで擬似

等流場を形成して水深を計測した。流動機構の検討においては水面変動の計測、流速の点計測、表面流速の多点同時計測を行った。水面変動の計測は超音波水位計を、流速の点計測は電磁流速計を用いて行い、流速の多点同時計は面的な範囲で測定が可能である PIV (Particle Image Velocimetry) 法により行った。超音波水位計の出力信号は 100Hz で、AD 変換した後 1 測点 4096 個のデータに関して統計処理が施された。電磁流速計は主流速 u 及び横断方向流速 v を計測する I 型電磁流速計と、横断方向流速 v と鉛直方向流速 w を計測する L 型電磁流速計を用い、それぞれの出力信号は 100Hz で、超音波水位計と同様の統計処理を行った。PIV 法による流速の計測においては、ビデオカメラを用いて水路真上から表面流の撮影を行った。表面流速の計測時間は 20 秒、トレーサとして粒径 30 μm , 比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。可視化画像はフレームレート 29.97fps (frame per second), 720 $\times$ 480 (pixel) のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録し、PIV 法によって処理された。PIV の計測対象領域は $x=250\text{cm} \sim x=300\text{cm}$, $y=20\text{cm} \sim y=20\text{cm}$ の 50cm $\times$ 40cm として各ケース計測を行った。ここで、本論では水路中央からみて内側の植生帯境界を植生帯内側境界、外側の植生帯境界を植生帯外側境界と呼ぶことにする。

3. 抵抗特性

図-2 に植生帯間の距離の変化に伴う水深変化を示す。水深 H は植生高さ H_v で無次元化を行った。流量・勾配の異なる条件下においても、いずれも同様の曲線を描いており、ほぼ相似形をなしているのが読み取れる。植生帯が水路中央 1 列に配置されている状態 $B_c=0$ cm から 2 列に変化

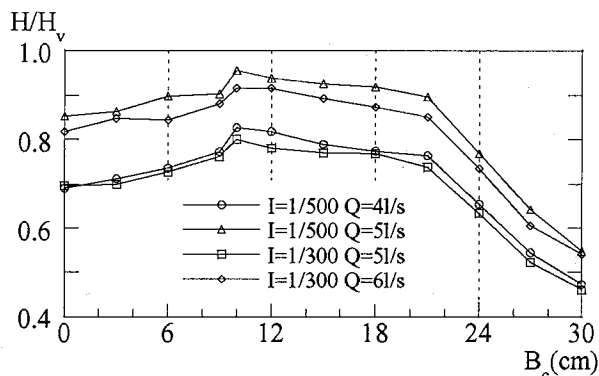


図-2 植生帯間の距離の変化に伴う水深変化

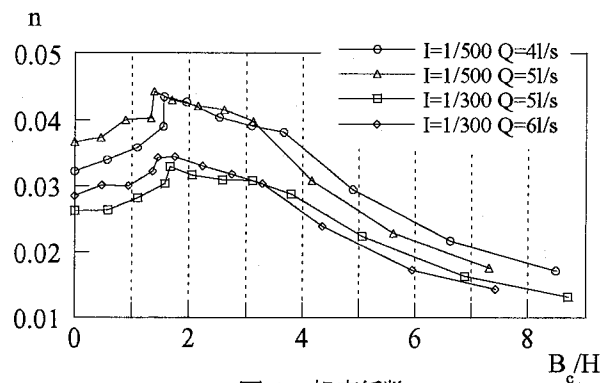


図-3 粗度係数

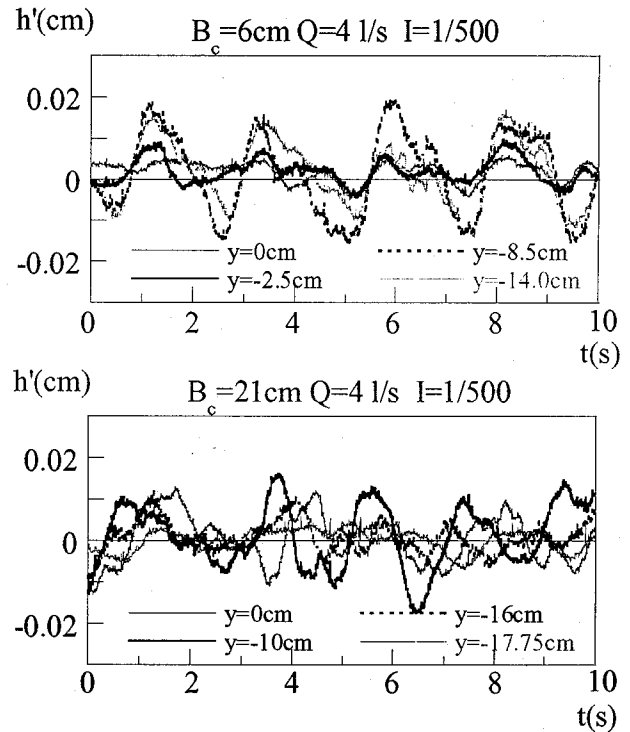
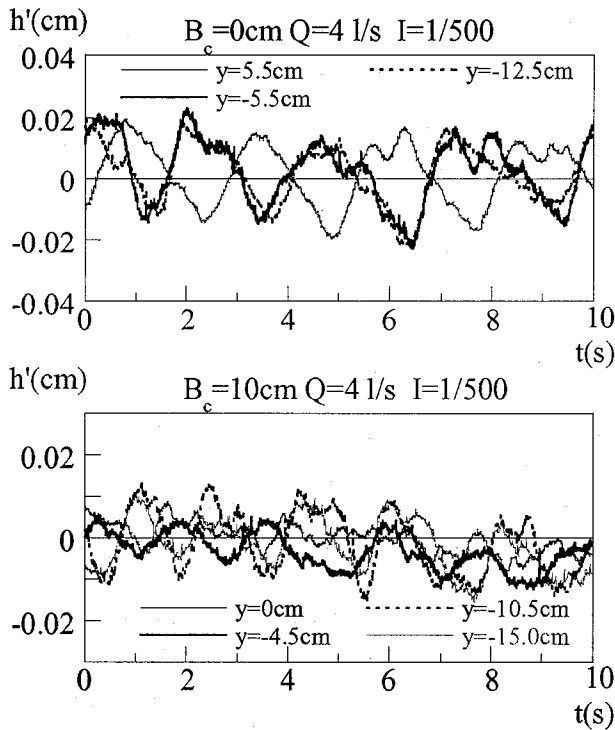


図-4 水面変動の時系列

させ、植生帯間の距離を広げていくと緩やかではあるが水深が増大し、 $B_c=10\text{cm}$ では急に水深変化が大きくなり最大値をとる。さらに植生帯間の距離を広げていくと緩やかに水深は減少していき、 $B_c=21\text{cm}$ より植生帯の間隔を広げると $B_c=0\text{cm}$ よりも水深が小さくなり、その後は急激に水深が減少していくことが確認できる。ここで、今回の実験は水路幅 $B=40\text{cm}$ の有限幅という条件の下で行っているため、側壁の影響を受けることからこれまで述べたような現象が起きると考えられる。これにより、今回の $B_c=21\text{cm}$ 以下のような側壁の影響を強く受けない条件下における植生帯2列配置の水深は、2列配置に比べ非植生域と植生域の接触面積が小さい中央1列配置の $B_c=0\text{cm}$ における水深よりも大きくなることが予想される。

図-3 に植生帯間の距離の違いによる抵抗特性を粗度係数 n を用いて評価した値を示す。横軸は植生帯間の距離と水深の比 B_c/H である。粗度係数 n の算出において、潤辺長は流体が接する固体境界面の周辺長と定義した。ここで、側壁の抵抗をいずれのパターンにおいても無視し、径深を

水深で近似している。そのため、植生帯が主流部と接する境界面は潤辺と見なしておらず、植生帯の抵抗は底面境界の抵抗として n 値にくみ込まれている。いずれの実験条件下においても植生帯間の距離と水深の比が約1.5~1.8で n 値が最大となり、 $B_c=0\text{cm}$ における n 値に比べ約20%大きい値を示す。これにより、植生帯間の距離と水深の比が約1.5~1.8となる条件下で最も植生帯を横断する流れの相互作用が強くなることが予想され、その影響が抵抗特性に大きく影響することが考えられる。

4. 流動機構

植生帯間の距離の変化が流れの抵抗特性に与える要因として、水面変動や二次流、運動量輸送特性といった流動機構の影響が挙げられる。そこで、勾配 $I=1/500$ 、流量 $Q=4\text{l/s}$ の条件下、植生帯が中央1列に配置されている $B_c=0\text{cm}$ 、2列配置において水深が最大値まで増加する前の $B_c=6\text{cm}$ 、水深が最大値となる $B_c=10\text{cm}$ 、水深が最大値から減少し、

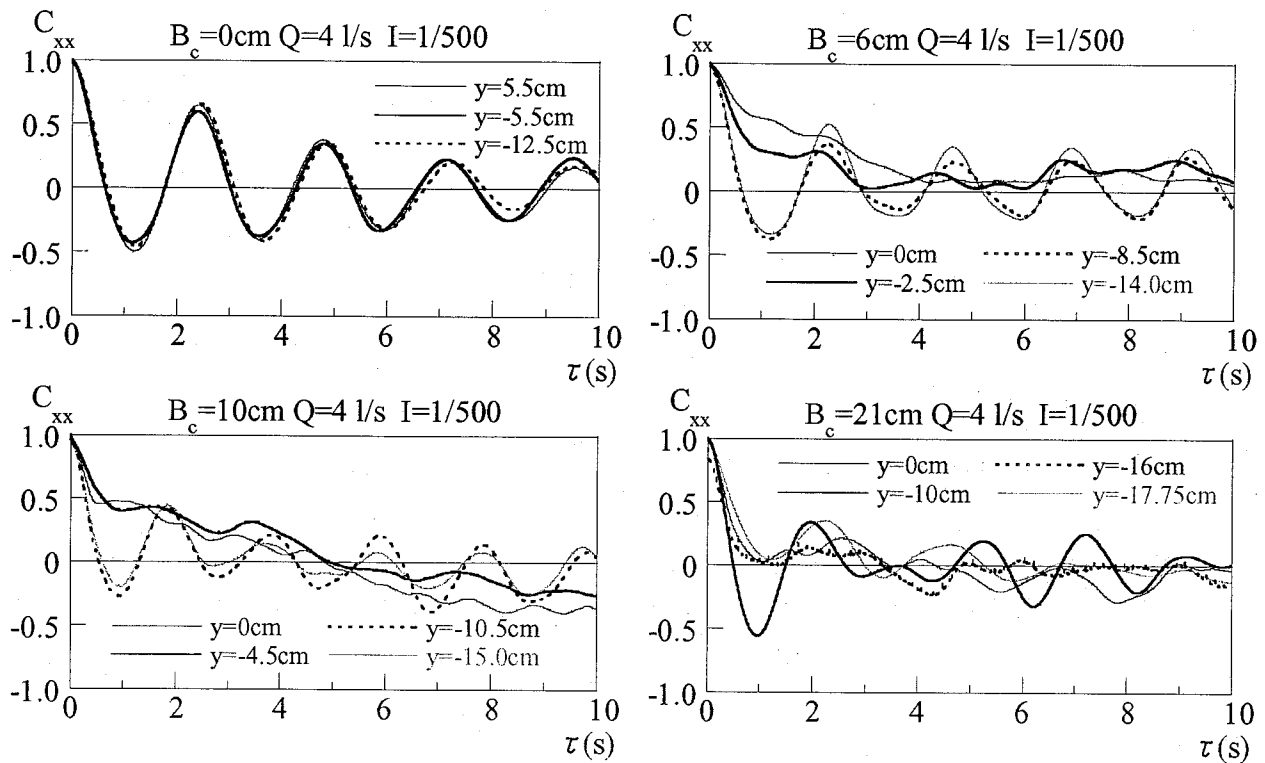


図-5 水面変動の自己相関係数

さらに急激に変化する前の $B_c=21\text{cm}$ となる4つ配置に関して流動機構の詳細な検討を試みる。ここで、 $B_c=21\text{cm} \sim 30\text{cm}$ に関しては有限幅という実験条件の影響を受けることが予想されるため、詳細な検討は割愛した。

4.1 水面変動特性

図-4は $B_c=0, 6, 10$ および 21cm における横断方向の水面変動の同時計測時系列データである。各ケースにおける計測位置は、 $B_c=0\text{cm}$ は植生帯両境界と右岸側の主流部中央の3点、 $B_c=6, 10$ および 21cm では水路中央、右岸側植生帯両境界付近、右岸側主流部中央の4点において計測を行っている。詳細な計測位置は図中に示すとおりである。 $B_c=0\text{cm}$ においてはこれまでの大本らの研究³⁾同様、植生帯両境界で逆位相をとり、いずれも高い周期性を有する。 $B_c=6\text{cm}$ では右岸側の植生帯境界付近 $y=-8.5\text{cm}$ と右岸側主流部中央 $y=14.0\text{cm}$ では $B_c=0\text{cm}$ 同様高い周期性を有しているが、水路中央部では水面振動の振幅が急激に抑えられ、周期の把握が困難となっている。 $B_c=10\text{cm}$ では、振幅は植生帯外側境界付近に比べ小さいものの、 $B_c=6\text{cm}$ に比べ水路中央の水面変動が活発となっていることが伺える。 $B_c=21\text{cm}$ では、その他のケースと異なり、水路中央部において水面変動が活発になり、植生帯外側境界付近で振幅が小さくなっている。

図-5に各ケースにおける水面変動の自己相関係数を示す。自己相関係数は式(1)で求める³⁾。

$$C_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad (1)$$

$B_c=0\text{cm}$ では全計測点においてセカンドピークが2.4sとほぼ同程度であり、高い周期性と相関性を有している。

$B_c=6\text{cm}$ では右岸側の植生帯外側境界付近 $y=-8.5\text{cm}$ と右岸側主流部中央 $y=14\text{cm}$ ではセカンドピークが2.2~2.3sと高い周期性を示すものの、水路中央部の $y=0\text{cm}$ 、 $y=2.5\text{cm}$ では周期の把握が困難である。 $B_c=10\text{cm}$ に関しても $B_c=6\text{cm}$ と同様な傾向がみられるが、右岸側の植生帯外側境界付近 $y=10.5\text{cm}$ と右岸側主流部中央 $y=15.0\text{cm}$ のセカンドピークは約1.8sと $B_c=0$ および 6cm と比べ周期が短いことが確認できる。 $B_c=21\text{cm}$ では植生帯内側境界において相関性が高いことが伺えるが、植生帯右岸側境界付近においては壁面の影響を受けるためか相関性は低いことが読み取れる。このように、植生帯間の距離を変化させることで水面変動の挙動に大きな影響を与えることが明らかになった。

4.2 表面流況

図-6はビデオ撮影によるPIV法を用いて算出された表面流における主流速 U と横断方向流速 V の横断方向分布である。いずれのケースにおいても主流速 U は植生域ではほぼ0に近い値を示しており、植生帯境界付近で急激に増大し、ほぼ主流部中央で極大値をとる。 $B_c=0\text{cm}$ では植生帯を挟んで2つの主流部をもち、それぞれの主流速 U の極大値は約14cm/sと同様の値を示す。 $B_c=6\text{cm}$ では、水路両端の主流部において主流速 U の極大値は左岸側が約18cm/s、右岸側が約17cm/sとほぼ同様の値となるが、水路中央部では植生帯内側両境界の間隔が狭いために、主流速 U が約7cm/sと両端の主流部における主流速 U の極大値の約40%にしか満たない。 $B_c=10\text{cm}$ では、水路両端の主流部において主流速 U の極大値が約15cm/sと同様の値を示す。また、水路中央部の主流速は $B_c=6\text{cm}$ と比べ植生帯内側両境界の間隔が広がっているため極大値が約11cm/sと水

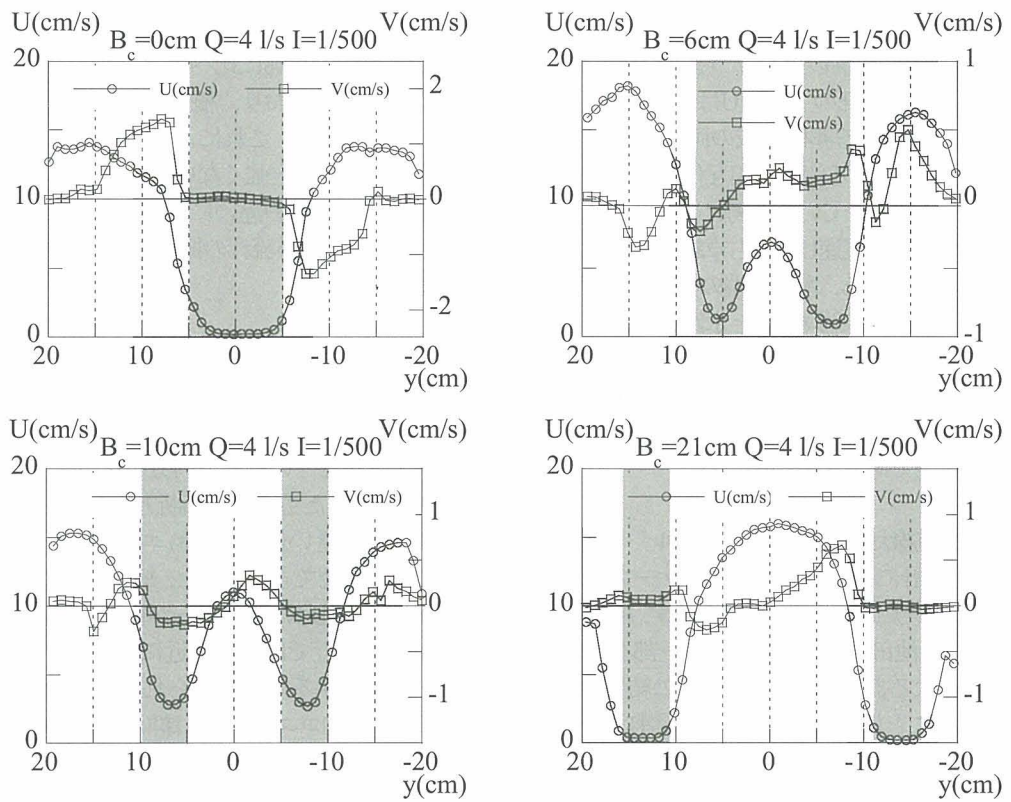


図-6 表面流速の横断方向分布

：植生域

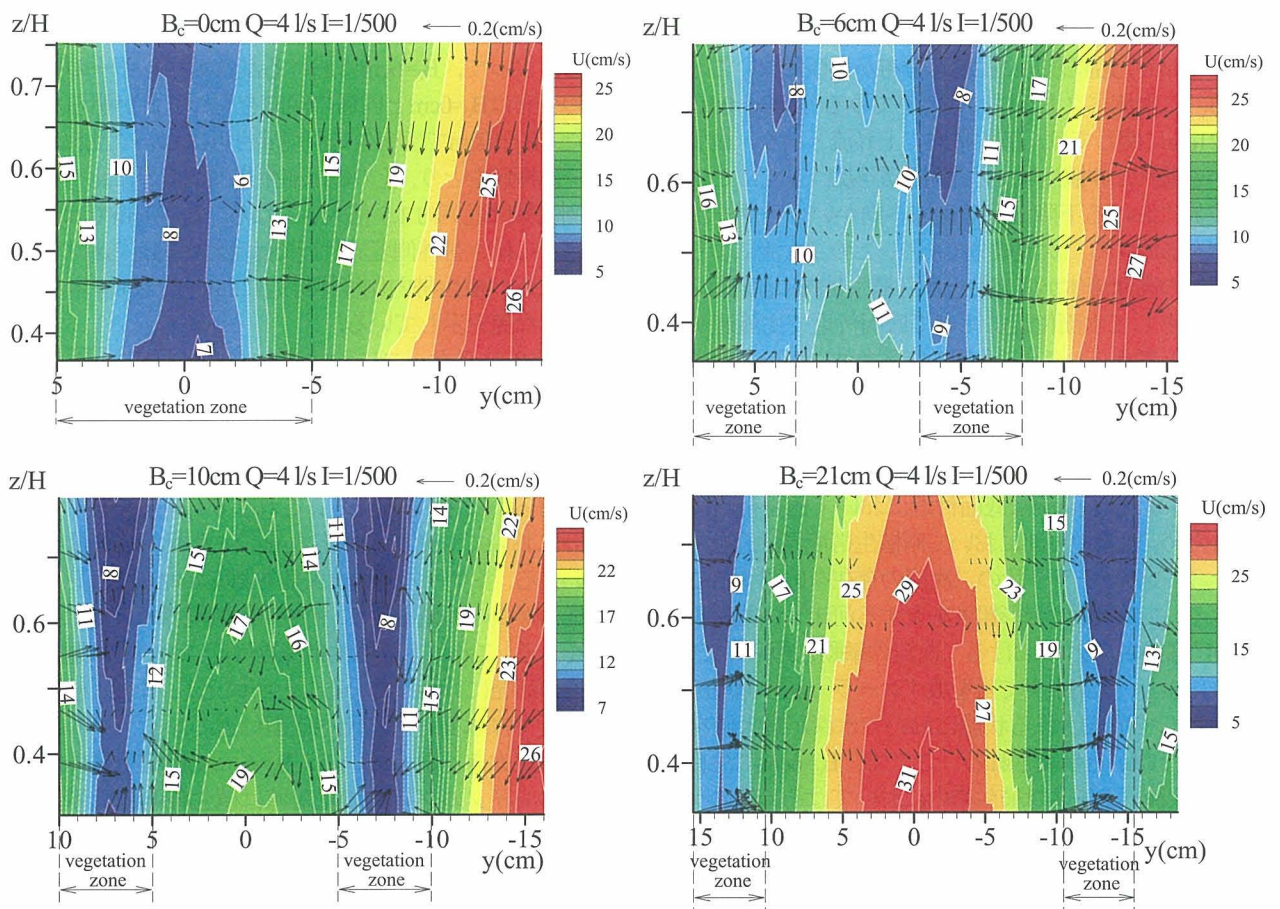


図-7 主流速Uの等値線および二次流ベクトル

路両端における主流速 U の約 70%まで発達している。しかし、 $B_c=10\text{cm}$ の条件下では植生帯間の距離が水路両端の非植生域の横断方向距離と同様となるにも関わらず、水路両端の非植生域に比べ中央部の主流速 U は小さな値を示す。これは水路中央部における非植生域の両端が植生帯であるため、両植生帯を横断する流れが相互作用を及ぼす影響により主流速 U が抑えられていると考えられる。 $B_c=21\text{cm}$ では水路中央において主流速 U が最も卓越しており、その値は約 16cm/s となっている。水路両端の非植生域では、その幅が狭いために主流速が約 8cm/s と水路中央における主流速 U に比べ約 50%程度に抑えられている。また、いずれのケースについても横断方向流速 V は植生帯両境界で主流速の空間勾配が大きくなることから、植生帯境界において運動量輸送が活発であることが伺える。

4.3 主流速 U の等値線および二次流ベクトル

図-7 に電磁流速計によって計測した各ケースにおける主流速の等値線および二次流ベクトルを示す。植生帯内の流速を計測する際、池田ら⁷⁾は模擬植生の一部を切り抜きピトー管とLDAによる計測を行ったが、その結果、模擬植生を一部抜き取ることによる流れ場への影響はほとんど無いことを示した。本実験においても模擬植生の一部を横断方向に抜き取った上で計測を行った。まずいずれのケースとも植生帯内においては周辺部に比べ主流速が抑えられ、非植生域に向かうにつれ主流速が急激に増大していく傾向が読み取れる。また、 $B_c=6, 10$ および 21cm では水路中央において水面付近に比べて底面付近の主流速が大きくなっており、鉛直方向に主流速分布が様でないことが伺える。二次流ベクトルについてみると、 $B_c=0, 10$ および 21cm に関しては、植生帯内で上昇流となり、植生帯境界から離れた非植生域では下降流が現れている。この植生帯境界における下降流は植生域へ向かいローラー状の循環流を形成する二次流成分であり、この二次流により植生帯周辺の高速流体が底面付近から植生帯内に流れ込み、その結果として水面付近に比べて底面付近で主流速が大きくなると考えられる²⁾。今回の実験条件において最も水深が大きくなった $B_c=10\text{cm}$ に注目すると、二次流ベクトルは植生帯内で上昇流となり、そこから水路中央部に向かう下降流と植生帯外側に向かう下降流に分かれている。水路中央部における下降流は底面付近において植生帯内に入り込むため、水路中央部において両植生帯境界付近を中心とした 2 つのローラー状の二次流の存在を確認することができる。この現象は台形粗度を有する河床⁸⁾や縦筋河床^{9,10)}を伴う開水路流れにおける二次流の挙動と類似している。これにより、水路中央で対を成すローラー状の循環流が最も安定して形成される状態において水深が最大値をとるのではないかと示唆される。ここで、 $B_c=6\text{cm}$ に注目すると、二次流ベクトルは植生帯内においてはその他のケース同様上昇流となっているが、水路中央部の非植生域ではその他のケースと異なり全体的に上昇流となる傾向がみられる。これは植生帯内側両境界の間隔が狭いために、水路中央部で $B_c=10\text{cm}$ のようにローラー状の循環流を形成す

る二次流が発生せず、植生域と同様の二次流特性を有するためと考えられる。また、 $B_c=21\text{cm}$ では水路中央部において主流速が周辺部に比べ大きくなるため二次流ベクトルは小さくなっており、植生帯周辺で $B_c=0\text{cm}$ と同様の二次流の挙動をとる。これにより $B_c=21\text{cm}$ では両植生帯間の相互作用はそれほど強くないことが予想される。このように、植生帯間の距離の違いによって二次流の挙動は大きく変化し、その影響が流れの抵抗特性に大きく影響することが伺える。

4.4 乱れ特性

乱れ特性に関しては、二次流および植生の揺動の影響が強く現れることが予想される。図-8 に各ケースにおける乱れエネルギーの横断方向分布を示す。いずれのケースも図-7 に示した主流速の横断方向分布において主流速の空間勾配が大きい位置で乱れエネルギーが大きくなっていることが確認できる。また、植生帯内では水面付近に比べ底面付近の乱れエネルギーが卓越しており、非植生域の植生帯境界付近では水面付近に比べ底面付近の乱れエネルギーが卓越する傾向がみられる。 $B_c=0\text{cm}$ では、植生帯内において乱れエネルギーは抑えられ、植生帯境界付近で極大値を示し、非植生域では植生帯境界から離れていくにつれ減少していく。 $B_c=6\text{cm}$ では植生帯外側境界で極大値をとるが、植生帯内側境界では極大値をとらず乱れエネルギーは小さな値を示す。これにより、前述したように植生帯内側両境界の間隔が狭い場合においては水路中央の非植生域は植生域と同様の流れ構造を有することが認められる。よって、 $B_c=6\text{cm}$ における乱れエネルギーの横断方向の分布は $B_c=0\text{cm}$ と同様の傾向をもつことが明らかになった。 $B_c=10\text{cm}$ では植生帯両境界付近において乱れエネルギーは極値をとり、その値は植生帯内側境界に比べ植生帯外側境界付近が約 1.5 倍大きくなる。 $B_c=21\text{cm}$ では側壁の影響から植生帯外側境界付近では乱れが抑えられており、それに比べ植生帯内側境界付近において乱れエネルギーが大きな値を示している。

図-9 に各ケースにおけるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の横断方向分布を示す。今回の実験条件のように、二次流の挙動が活発な流れにおいては横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ が強く発生し、これが流れの構造を大きく支配していることが明らかにされている⁸⁾。これより、植生を有する河道設計においてレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ は重要な水理量であるといえる。各ケースとも植生帯外側境界付近ではレイノルズ応力が負の極値をとり、植生帯内側境界付近では正の極値をとる。これにより植生帯境界付近においては運動量の交換が活発に行われていることが伺える。また、植生帯境界付近では水面付近に比べ底面付近のレイノルズ応力の絶対値が大きくなっている。 $B_c=6\text{cm}$ では植生帯外側境界付近のレイノルズ応力の絶対値は植生帯内側境界付近に比べ約 5 倍もの値を示す。 $B_c=10\text{cm}$ では植生帯内側境界付近のレイノルズ応力の絶対値も $B_c=6\text{cm}$ に比べ大きくなるが、植生帯外側境界付近ではその 2 倍程度の値を示す。 $B_c=21\text{cm}$ では植生帯内側境界付近におけるレイノルズ応

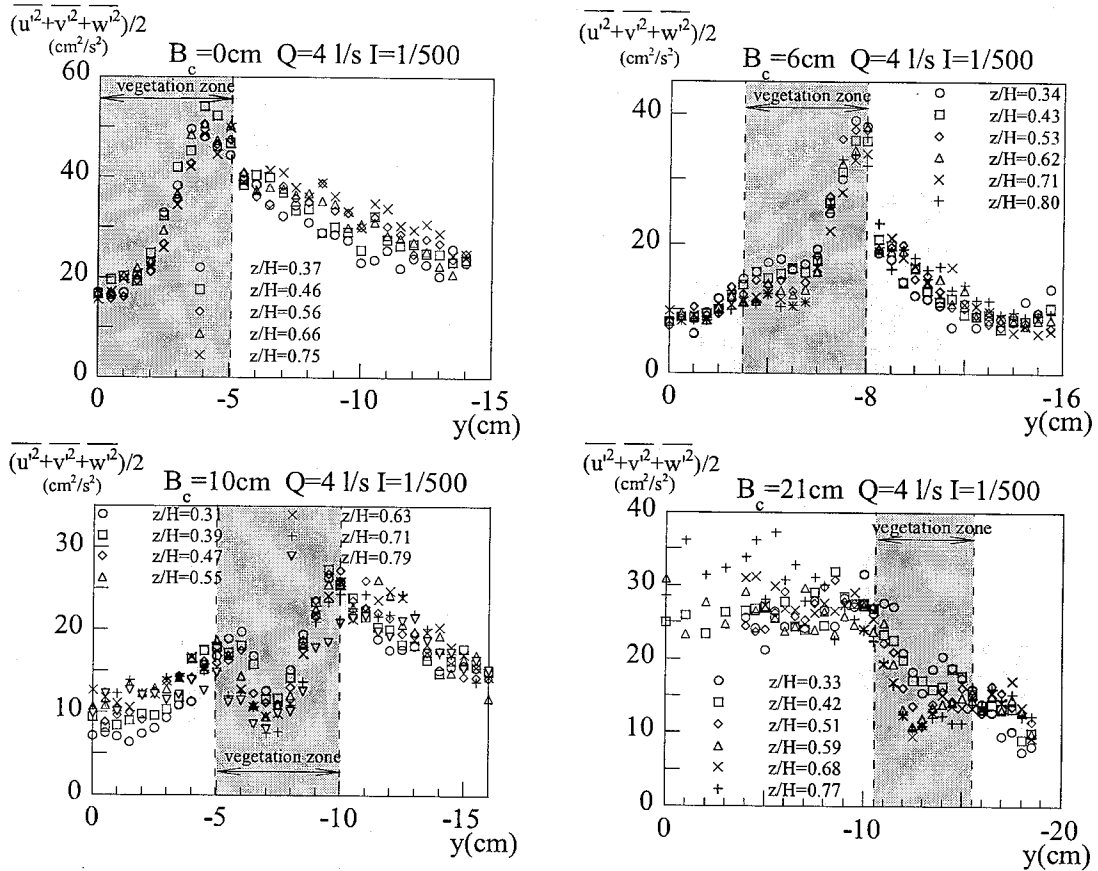


図-8 乱れエネルギーの横断方向分布

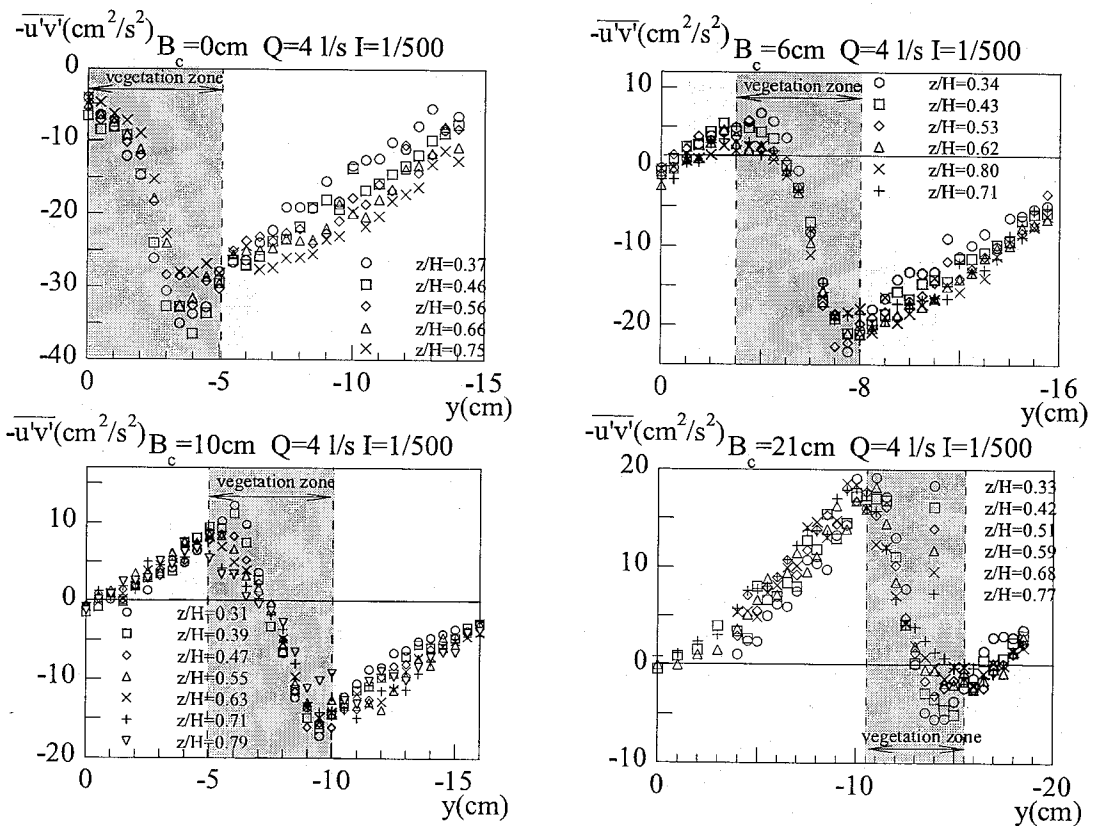


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断方向分布

：植生域

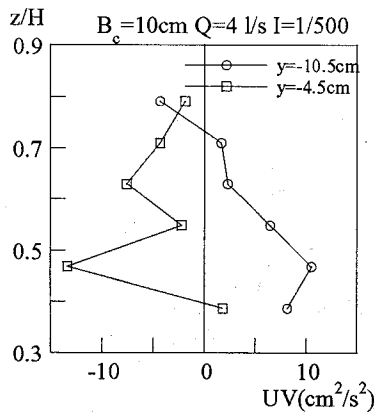


図-10 移流による運動量輸送 UV

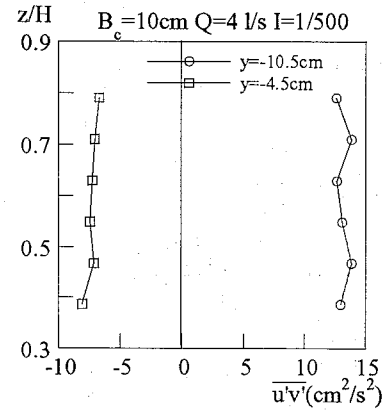
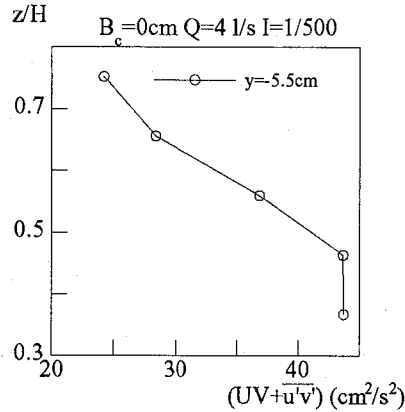


図-11 流速変動による運動量輸送 $\overline{u'v'}$

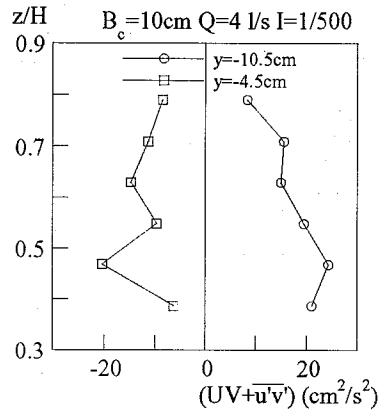
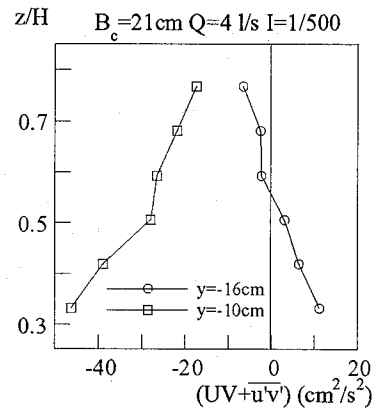
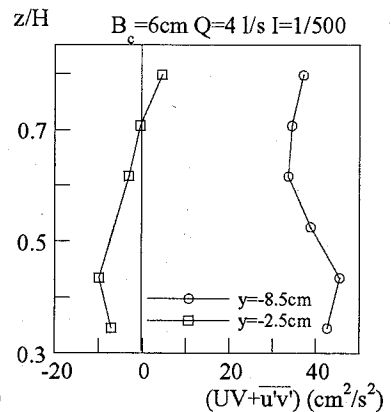


図-12 全運動量輸送 $(UV + \overline{u'v'})$



力の絶対値が、植生帯外側境界付近に比べ約3倍大きくなる。このように植生帯間の距離が変化するとその乱れ特性も大きく変化することが伺える。

4.5 植生帯境界における運動量輸送

植生の揺動に伴う乱れや植生帯を横断する流れは運動量・物質の交換を促進することが予想される。ここで、横断方向の運動量輸送を次式で与える。

$$\overline{uv} = (\overline{U + u'}) (\overline{V + v'}) = \overline{UV} + \overline{u'v'} \quad (2)$$

UV は移流による運動量輸送を、 $\overline{u'v'}$ は流速変動による運動量輸送を示す。この2つの項および全運動量輸送について、植生帯境界に対してどのように輸送・交換されているかを検討する。

図-10 に $B_c = 10\text{cm}$ における移流による運動量輸送の鉛直方向分布を、図-11 に $B_c = 10\text{cm}$ における流速変動による運動量輸送の鉛直方向分布を示す。計測位置は右岸側の植生帯両境界付近 $y = -4.5\text{cm}$, $y = -10.5\text{cm}$ である。 $B_c = 10\text{cm}$ においては、いずれの運動量輸送についても、植生帯両境界における運動量輸送の分布はほぼ対称性を有していることが伺える。移流による運動量輸送については非植生域と植生域の運動量交換が鉛直方向に互いに行われているものの、流速変動による運動量輸送においては、植生帯両境界付近では非植生域から植生域へと運動量が運び込まれている。また、植生帯両境界での流速変動における運動量輸

送の絶対値は、植生帯内側境界に比べ外側境界では1.5倍程度となる。これまでに大本らの研究⁹⁾によって、非越流状態においては移流による運動量輸送に比べ流速変動による運動量輸送が卓越することが明らかにされているが、今回の実験条件においても同様の結果となった。ここで、今回は電磁流速計による計測から運動量輸送を算出したが、大小関係については説明できるものの、精度が十分とはいえず、今後さらに詳細に検討を行わなければならない。

図-12 は植生帯境界における移流による運動量輸送と流速変動による運動量輸送を合計した全運動量輸送の鉛直方向分布である。計測位置は図中に示すとおりである。 $B_c = 0\text{cm}$ の植生帯外側境界では、運動量は非植生域から植生域へと運びこまれる傾向が見られる。 $B_c = 6\text{cm}$ では植生帯外側境界の運動量の交換が活発になり、そこから $B_c = 10\text{cm}$ に植生帯の間隔を広げると植生帯外側境界の運動量輸送は小さくなるものの、植生帯内側境界の運動量輸送が $B_c = 6\text{cm}$ に比べ活発になる。そして $B_c = 21\text{cm}$ では植生帯外側境界の運動量輸送は極端に抑えられ、植生帯内側境界の運動量輸送が卓越する。このように植生帯間の距離の違いにより運動量輸送特性が変化し、その影響によって流れの抵抗特性も変化が生じると考えられる。

5. 植生帯内外の混合特性

植生帯境界における混合を植生帯内外の境界に作用す

表-2 境界混合係数 f

植生帯間隔	$B_c=0\text{cm}$	$B_c=6\text{cm}$		$B_c=10\text{cm}$		$B_c=21\text{cm}$	
植生帯境界	-	内側	外側	内側	外側	内側	外側
混合係数	0.20	0.04	0.22	0.13	0.16	0.19	0.05

るせん断応力によって表現する¹¹⁾。速度差のある流体間に作用するせん断応力 τ_v は、一般に、式(3)で流速差と結び付けられる¹²⁾。

$$\tau_v = \rho f (\Delta U^2) \quad (3)$$

ここに、 ρ ：水の密度、 ΔU ：植生帯内外の流速差、 f ：混合の強さを表す境界混合係数である。また、 $\Delta U = U_m - U_p$ であり、 U_m は主流部の平均流速を表し、 U_p は植生帯内の平均流速を表す。境界せん断応力 τ_v は図-12 の実測データからそれぞれ水深方向に平均した値を用いて算出した。通常、実河川で用いられている境界混合係数は、河岸に接した樹木群の場合には約 0.03 であるのに対して、樹木群の両側に流れのある場合では約 0.10 を標準としている¹³⁾。

式(3)によって求めた右岸側植生帯両境界における境界混合係数 f を表-2 に示す。植生帯外側境界に注目すると、 $B_c=0\text{cm}$ では 0.20 だった混合係数が、植生帯を 2 列に配置した $B_c=6\text{cm}$ では 0.22 と若干大きくなり、そこから $B_c=10\text{cm}$ に植生帯の間隔を広げると 0.16 と減少する。 $B_c=21\text{cm}$ ではさらに混合係数が減少し、その値は 0.05 と $B_c=0\text{cm}$ の 25% 程度に抑えられる。植生帯内側境界においては植生帯の間隔を広げていくにつれ混合係数が増大していくことが伺える。それぞれの植生帯間隔についてみると、 $B_c=6\text{cm}$ では植生帯外側境界において、植生帯内側境界に比べ 5.5 倍もの値を示し、運動量の交換が活発に行われていることが確認できる。 $B_c=10\text{cm}$ では植生帯内側境界における混合係数が $B_c=6\text{cm}$ より増加し、植生帯外側に比べ約 80% の値を示し、その他のケースよりも両植生帯境界における運動量輸送がバランスしていることが読み取れる。 $B_c=21\text{cm}$ では有限幅の影響により、植生帯外側境界が内側境界における混合係数と比べ 25% 程度に抑えられている。さらに、それぞれのケースの大小関係を右岸側植生帯両境界の混合係数を足し合わせて比較すると、水深が最も大きくなった $B_c=10\text{cm}$ が 0.29 と混合係数も最も大きくなる。このように、 $B_c=10\text{cm}$ では運動量輸送が他のケースに比べ活発になることから、主流速が抑えられ、流れの抵抗が増大することが明らかとなった。そしてほぼ水深が同程度であった $B_c=6\text{cm}$ および $B_c=21\text{cm}$ では混合係数がそれぞれ 0.26 および 0.24 と同様の値を示す。そして最も水深が小さい $B_c=0\text{cm}$ が混合係数も最も小さい値となった。このように、植生帯境界における混合係数を用いることにより、植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性の大小

関係を表現できることが明らかになった。

6. おわりに

本研究では、植生帯を中央 2 列に配置し、その植生帯間の距離を変化させることで、植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性および流動機構の検討を行った。得られた知見を列挙すると以下のとおりである。

- (1) 流量・勾配の異なる条件下でも、植生帯間の距離の変化に伴う水深変化は同様の曲線を描いており、ほぼ相似形をなす。粗度係数についてみると、いずれも植生帯間の距離と水深の比が約 1.5~1.8 で n 値が最大となる。これにより、植生帯間の距離と水深の比が約 1.5~1.8 となる条件下で最も植生帯を横断する流れの相互作用が強くなることが予想される。
- (2) 二次流ベクトルについてみると、今回の実験条件において、最も流れの抵抗が大きくなった中央 2 列配置では、水路中央部に両植生帯境界付近を中心とした 2 つのローラー状の二次流の存在を確認することができた。また、植生帯内側両境界の間隔が狭い状態では、水路中央部でローラー状の循環流を形成する二次流が発生せず、植生域と同様の二次流特性を有することが明らかになった。このため、水路中央で対を成す最も安定したローラー状の循環流が形成される状態において、流れの抵抗が最も大きくなるのではないかと予想される。
- (3) 植生帯境界付近での運動量輸送特性についてみると、今回の実験条件では、いずれも移流による運動量輸送に比べ流速変動による運動量輸送が卓越していることが認められた。また、植生帯間の距離の変化に伴い、運動量輸送特性も大きく変化することが確認できた。
- (4) 植生帯境界における混合係数を用いることにより、植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性の大小関係を表現できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.61-70, 1994.
- 2) 大本照憲, 福井洋幸, 林俊一郎：水生植物を伴う流れの三次元構造について, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.427-432, 2000.
- 3) 大本照憲, 岡本隆之：水生植物群落を伴う開水路流れの水面変動と運動量輸送, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.991-996, 2003.

- 4) 大本照憲, 田中貴幸, 矢北孝一: 植生群落を伴う開水路流れにおける水面変動と流速変動の相互作用, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.499-504, 2005.
- 5) 富永晃宏, 長尾正志, 劉建, 鈴木徹也: 洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.477-482, 1995.
- 6) 大本照憲, 田中貴幸, 矢北孝一: 植生群落の配置が開水路流れの抵抗に与える影響, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1141-1146, 2006.
- 7) 池田俊介, 金沢稔, 太田賢一: 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.33-43, 1995.
- 8) 中川博次, 瀬津家久, 富永晃弘: 2 次流を伴う流れの乱流構造について, 第 26 回水理講演会論文集, pp.469-474, 1982.
- 9) 林俊一郎, 大本照憲, 滝川清: 数値直接シミュレーションによる縦筋河床上の三次元乱流構造の解明, 応用力学論文集, Vol.4, pp.591-600, 2001.
- 10) 林俊一郎, 大本照憲: DNS 解析による二次流の発生機構の解明: 水工学論文集, 第 45 巻, pp.559-564, 2001.
- 11) 福岡捷二, 藤田光一: 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第 180 号, pp.133-141, 1990.
- 12) 石川忠晴ほか: 開水路平面せん断流に関する実験的研究, 第 39 回年次学術講演会, 第二部, pp.473-474, 1984.
- 13) 国土技術研究センター編: 河道計画検討の手引き, 山海堂, pp.81-82, 2002.

(2006 年 4 月 13 日 受付)