

# 沈水状態の植生群落を伴う開水路流れの 抵抗特性と流動機構

FLOW RESISTANCE AND TURBULENT STRUCTURE  
IN OPEN CHANNEL FLOW WITH SUBMERGED VEGETATION

田中貴幸<sup>1</sup>・大本照憲<sup>2</sup>・田中寿幸<sup>3</sup>

Takayuki TANAKA, Terunori OHMOTO and Toshiyuki TANAKA

<sup>1</sup>学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

Vegetation colonies 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 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 convective momentum transport through the interaction between longitudinal vegetation zones.

**Key Words :** submerged vegetation, flow resistance, turbulent flow structure, momentum transport

## 1. はじめに

河川に繁茂する植生は、生物の生息環境を創出し、親しみや安らぎといった良好な景観を提供するなど河川環境の形成において重要な役割を担っている。一方で、近年多発する豪雨災害を受け、実河川における早急な治水安全度評価の見直しと河道整備が求められる中、河道内の植生は治水安全度上マイナス面を有することから残置、除去といった適正な管理が求められる。

このような河道内における植生の重要性から、植生群落を伴う河川流および開水路流の抵抗特性や流動機構に関する研究は多くなされている。

植生群落を伴う河川流に関する研究として、福岡ら<sup>1)</sup>は高草本域では倒伏・非倒伏、水没・非水没の別が流下状況を左右するため、洪水時の倒伏状況等を推定する方法と粗度係数を推定する方法を示した。清水ら<sup>2)</sup>は狭窄部地形と中州を有する渡良瀬川を対象として数値計算から洪水時の流況について検討を行った。特に現地の樹木繁茂状況を考慮した上での洪水流況や樹木群密度と水位上昇の関係および平面2次元の枠組みのもと浮遊砂輸送を数値計算から予測した。このように、河道内における植生の影響を、

実河川を対象として現地観測や数値計算により解明しようとする研究は現在活発に行われている。

また、植生群落を伴う開水路流の抵抗特性や流動機構に関する研究は植生の密度・剛性・倒伏状況・配置といった多様な観点から数多く行われている。その中で、植生群落の配置が植生流れの抵抗特性に与える影響について検討した研究として、渡邊ら<sup>3)</sup>は一般物理座標系における静水圧近似3次元非定常流数値モデル及び河床変動数値モデルを樹木群水制が配置された湾曲水路における流れと河床変動に適用し、樹木群の配置が流れと河床変動に与える影響を評価した。これより、樹木群水制が設置されると洗掘位置が河岸近傍から遠ざかり洗掘深が小さくなることを示した。さらに、樹木群の配置方法として水制間隔が異なるケースについて解析し、水制機能が樹木群水制間隔にあまり依存しないことを確かめた。富永ら<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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。また、植生帯が横断方向に2列に配置されるような条件下では、植生帯両境界にお

表-1 実験条件

水路中央側における植生帯両境界間の距離 $B_c$ (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	8,9,10	10	5.5	ナイロン糸	0.242	10

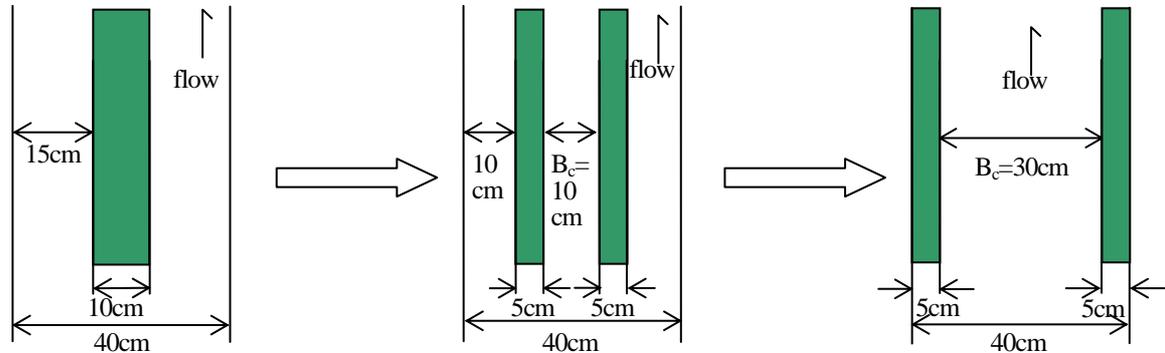


図-1 実験水路概要

いて植生帯を横断する流れを許容するために、水路中央部で植生帯を横断する流れが相互作用を及ぼし、流れの抵抗が増大するのではないかと予測した。そこで、非越流状態において、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<sup>6)</sup>。その結果、植生帯間の距離と水深の比が約1.5~1.8でn値が最大となること、および水路中央で対をなす最も安定したローラー状の循環流となる二次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ことを明らかにした。

このように、非越流状態における植生帯間の相互作用が開水路流れの抵抗に与える影響については詳細な検討が行われているものの、越流状態を対象とした検討は行われていない。そこで、本研究では越流状態に注目し、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について詳細な検討を試みた。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は全長10m、幅 $B=40$ cm、高さ20cmの亚克力樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯のモデルにはプラスチック板に水流の流れに追従して撓む6.10ナイロンブリュウスル（直径0.242mm、曲げ剛性 $EI=1.45 \times 10^4 \text{g} \cdot \text{cm}^2$ ）を5.5cm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 $B_c$ を0~30cm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。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 $Q=8,9$ および $10$  l/s、 $I=1/300$ では $Q=10$  l/sと設定する。いずれの条件下においても、水深は植生高さよりも大きい越流状態となる。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、いずれも流下方向の計測位置を $x=300$ cmに設定した。超音波水位計と電磁流速計の出力信号は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。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。いずれのケースにおいても同様の曲線を描いており、流量、勾配の違いによってはその曲線の挙動は大きく変化しないという非越流状態と類似した傾向をとる<sup>6)</sup>。植生帯水路中央1列配置である $B_c=0$ cmから2列配置に変化させると水深が緩やかに増大していき、 $B_c=9$ cmより植生帯間の距離を広げると水深が急に大きくなり、上向きの放物線を描くよ

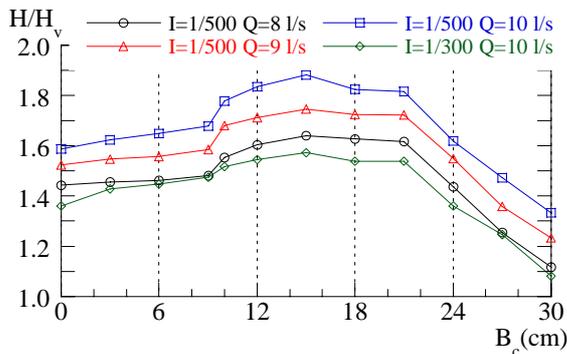


図-2 植生帯間の距離の変化に伴う水深変化

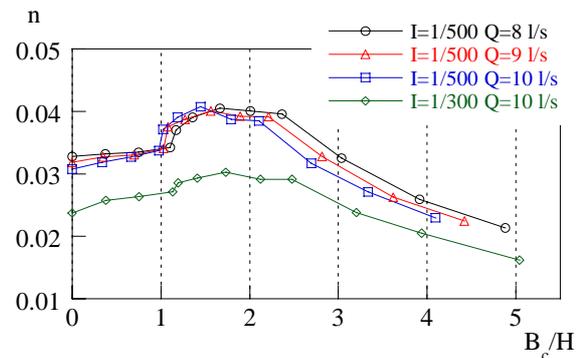


図-3 粗度係数

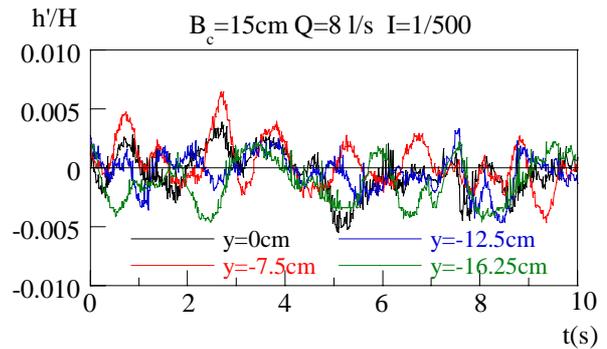
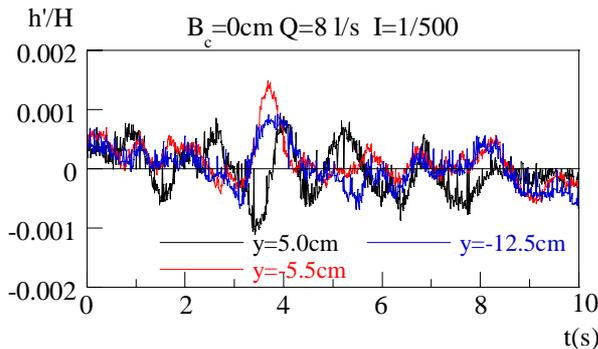


図-4 水面変動の時系列

うに増加していく．そして $B_c=15\text{cm}$ において水深が最大値をとった後，水深は緩やかに減少していき，さらに $B_c=21\text{cm}$ より植生帯間の距離を広げると水深は急激に減少していく様子が読みとれる．

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 $n$ の算出方法についてはこれまでの著者らの研究<sup>5,6)</sup>と同様である．いずれのケースにおいても $B_c/H$ が約1.5～1.8付近において $n$ 値が最大値をとる．これは非越流状態と類似した結果であり，非越流状態に比べより三次元性が強い流れとなる越流状態<sup>7)</sup>においても，植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性に関しては大きく変化しないことが明らかになった．

#### 4. 流動機構

植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性に影響を及ぼす要因を明らかにするために，流動機構の検討を行う．水路勾配 $I=1/500$ ，流量 $Q=8\text{ l/s}$ の条件下，水面変動特性の検討では植生帯中央1列配置の $B_c=0\text{cm}$ ，水深が最大値をとる $B_c=15\text{cm}$ の2つのケースについて，その他の特性ではさらに2列配置で間隔の狭い $B_c=3\text{cm}$ ，間隔が広く水深が急激に減少する前の $B_c=21\text{cm}$ を加えた4つのケースについて検討を行う．

##### (1) 水面変動特性

図-4は $B_c=0$ および $15\text{cm}$ 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．水深の変動量 $h'$ は水深 $H$ で無次元化した． $B_c=0\text{cm}$ での計測位置は植生帯両境界と右岸側の主流部中央の3点， $B_c=15\text{cm}$ ではそれに水路中央を加えた4点において計測を行っている． $B_c=0\text{cm}$ のような植生帯水路中央1列配置に関しては，大本ら<sup>8)</sup>によって非越流状態では水面変動の周期性が高いことが明らかにされているが，越流状態においては横断方向に植生帯境界のような明瞭な水面変動の変曲点を有さないことから非越流状態と比べ周期性が弱まっていることが伺える． $B_c=15\text{cm}$ も同様に周期性は低くなるものの，水面変動の振幅が $B_c=0\text{cm}$ に比べ顕著に大きくなっている．これは水面下において植生帯の境界数が $B_c=0\text{cm}$ に比べ多いことなどが要因として挙げられる．

##### (2) 主流速分布および二次流ベクトル

図-5は各ケースにおける時間平均した主流速 $U$ 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<sup>9)</sup>によって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が示されたため，本実験に関しても電磁流速計による計測範囲が確保できるよう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．主流速分布に注目すると，いずれのケースにおいても植生帯内および植生帯上層では主流速は極端に抑えられ，植生帯境界付近では主流速が急激に変化し，鉛直方向に植生帯を有さない領域において主流速が極大値をとる．鉛直方向に植生帯を有さない主流域では，水面付近に比べ底面付近において主流速が大きくなる様子が見てとれる<sup>6,7)</sup>．また，植生高さ以下の鉛直位置においては，横断方向に植生帯境界を有することから主流速

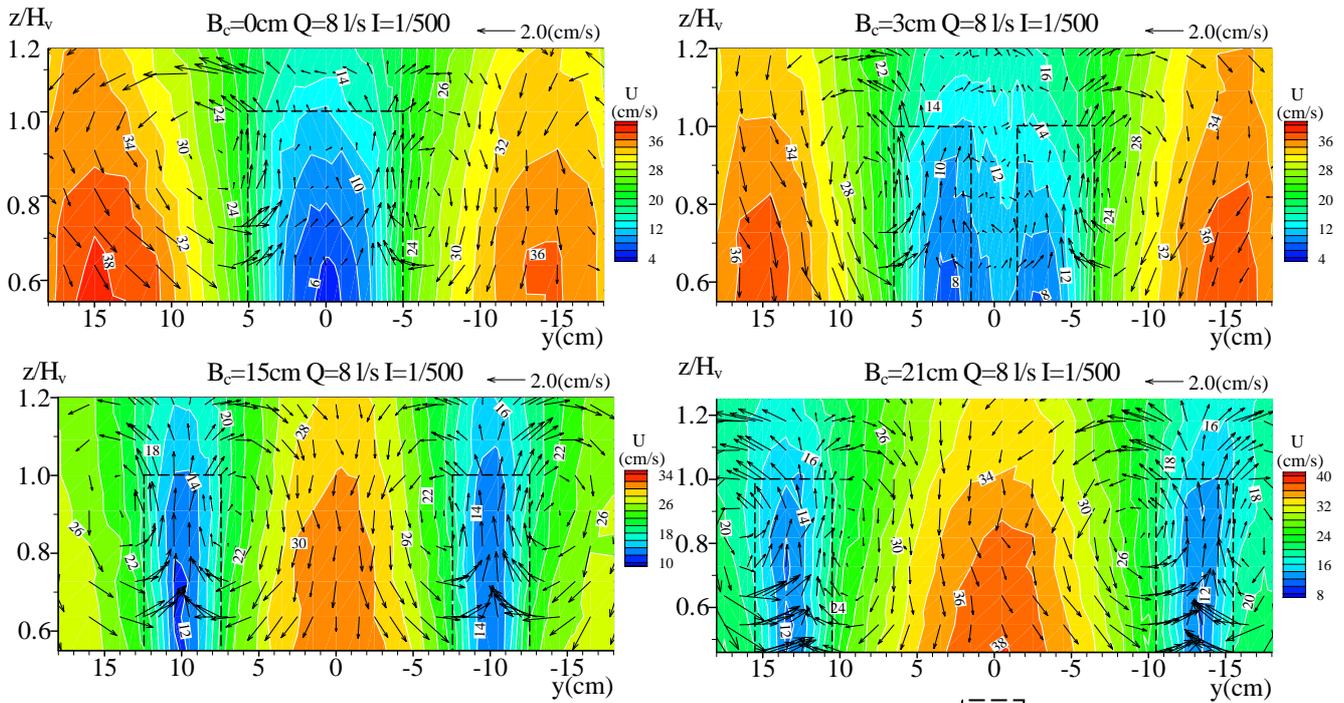


図-5 主流速Uの等値線および二次流ベクトル [---] : vegetation zone

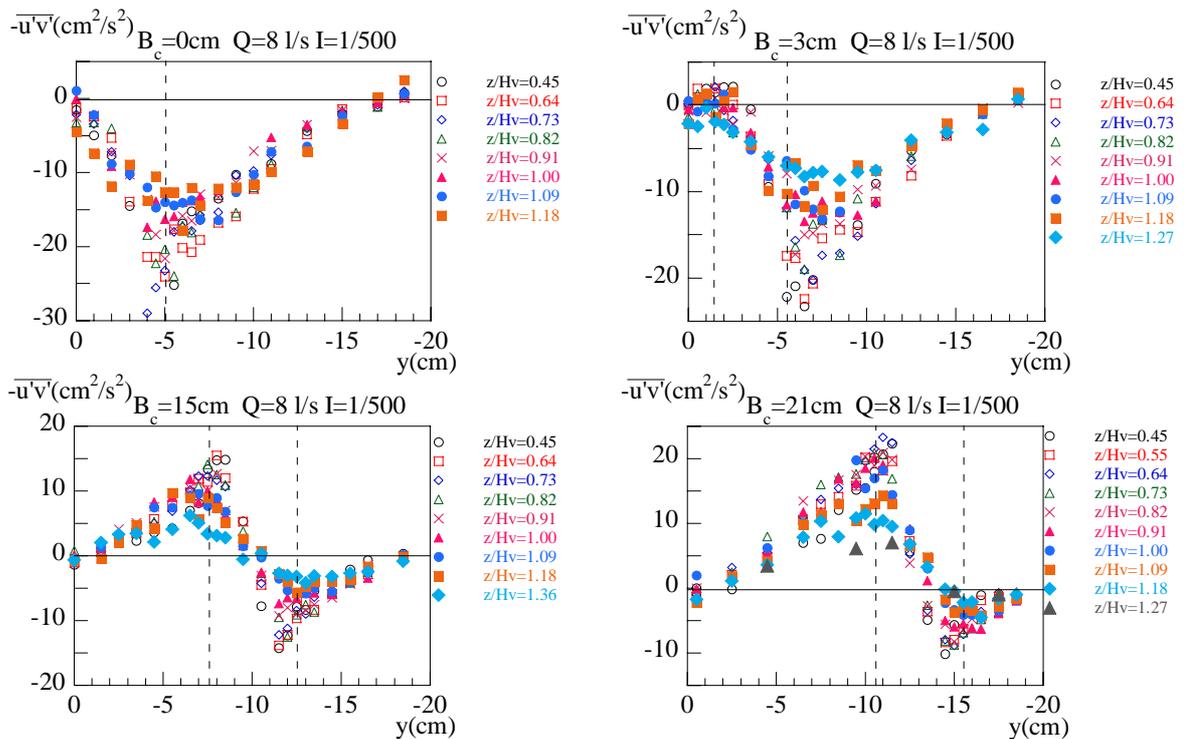


図-6 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断方向変化

の横断方向変化が大きくなるが、植生带上層の鉛直位置においては植生による流れの影響が小さいことから、主流速の横断方向変化は小さくなる。二次流に注目すると、 $B_c=0, 15$ および $21\text{cm}$ ではいずれも植生帯内では上昇流となり、植生帯上では植生帯から離れる方向をとる。その後下降流となって周囲の高速流体を伴いながら、半植生高さ付近およびそれ以下の鉛直位置において植生帯内に入り込む。このようなローラー状の二次流が植生高さの8~9割程度の鉛直位置において、植生帯境界を中心とし

て形成されている様子が見てとれる。また、植生帯境界上部において、かぶり水深を持つ複断面開水路の二次流の挙動に似た斜昇流<sup>10)</sup>の存在が見られるが、これは植生帯が弱い壁として作用するために発生したと考えられる。 $B_c=15\text{cm}$ に注目すると、両植生帯内側境界を中心とした水深スケールのローラー状の循環流が水路中央で対をなして形成されている様子が見てとれる。このため、 $B_c/H$ が約 $1.5 \sim 1.8$ となるような条件下において、水路中央で対をなすローラー状の循環流が最も安定して形成さ

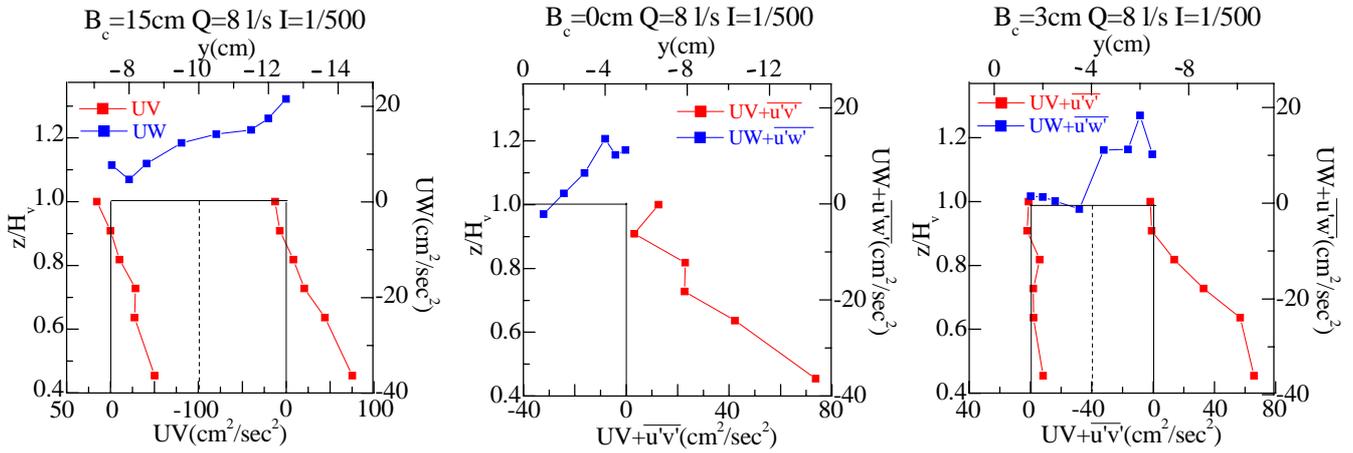


図-7 移流による運動量輸送

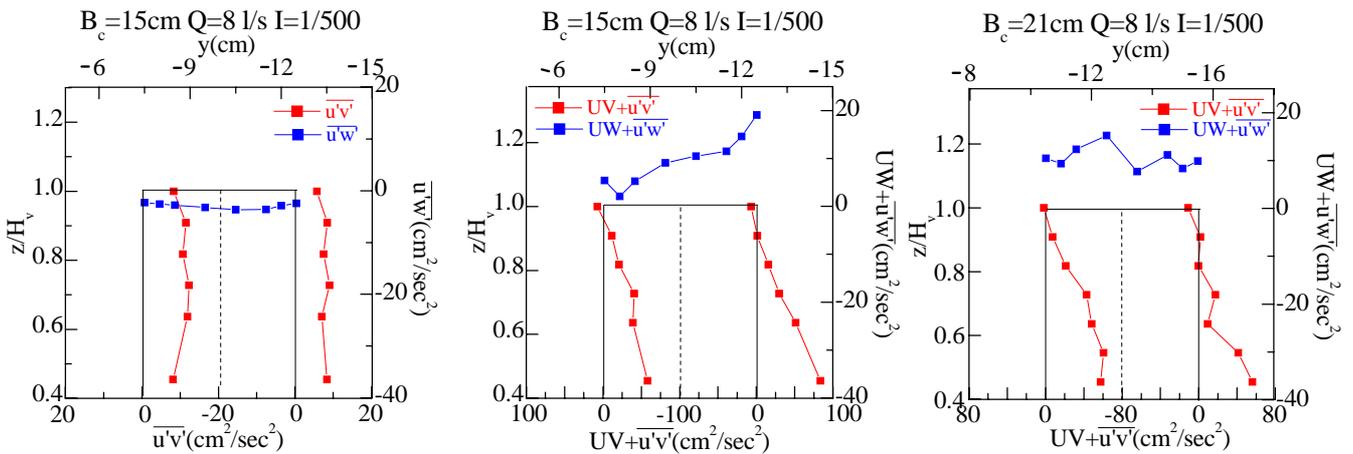


図-8 流速変動による運動量輸送

図-9 全運動量輸送

れ、その影響により流れの抵抗が大きくなることが示唆される。  $B_c=3\text{cm}$  に注目すると、植生帯外側境界においては他のケースと同様の二次流の挙動をとるが、水路中央の非植生域では他のケースと異なり上昇流が見られる。これは植生帯間の距離が狭いことから減速域が広がった状態となり、そのため  $B_c=0\text{cm}$  と同様な二次流の挙動をとることが要因と考えられる。ここで、非越流状態ではこのような現象は  $B_c/H$  が約 1.0 以下で見られたものの<sup>9)</sup>、越流状態では  $B_c/H$  が約 0.4 以下でしか認められなかった。この理由として、越流状態では非越流状態と異なり植生帯上の流れと植生帯間の流れとの運動量の交換が行われることで植生帯内側境界を中心としたローラー状の循環流が発達しやすくなるためと考えられる。

### (3) 乱れ特性

図-6に水路中央から右岸側に注目した各ケースにおけるレイノルズ応力  $-\overline{u'v'}$  の横断方向分布を示す。横断方向レイノルズ応力  $-\overline{u'v'}$  は植生域と非植生域との間の乱れによる運動量輸送を考える上で重要であり<sup>11)</sup>、また、大本ら<sup>7)</sup>によって乱れエネルギーの生成には  $-\overline{u'v'}$  の寄与が大きいことが明らかにされているため、今回はレイノルズ応力  $-\overline{u'v'}$  について検討を試みる。いずれのケースにおいても  $-\overline{u'v'}$  は植生帯外側境界で負の極値をとり、内側境界

で正の極値をとる。また、植生帯両境界において、 $-\overline{u'v'}$  の絶対値は水面から底面に向かうにつれ大きな値となり、水面付近では横断方向の乱れが抑えられている。 $B_c=3\text{cm}$  では植生帯内側境界における  $-\overline{u'v'}$  が発達せず小さな値となり、 $B_c=0\text{cm}$  と類似の分布となる。 $B_c=15\text{cm}$  においては植生帯両境界において  $-\overline{u'v'}$  の絶対値が同程度の値をとり、 $B_c=21\text{cm}$  になると植生帯内側境界において  $-\overline{u'v'}$  の絶対値が大きくなり、外側境界に比べ約 3 倍の値をとる。このように、植生帯間の距離の違いによって、その乱れ特性も大きく変化することが明らかになった。

### (4) 運動量輸送特性

横断方向および鉛直方向の運動量輸送を次式で与える。

$$\overline{uv} = \overline{(U + u')(V + v')} = UV + \overline{u'v'} \quad (1)$$

$$\overline{uw} = \overline{(U + u')(W + w')} = UW + \overline{u'w'} \quad (2)$$

$UV, UW$  は移流による運動量輸送を、 $\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$  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より、植生帯境界における運動量輸送特性の解明を試みる。植生帯内側および外側の両境界では横断方向における運動量輸送について、植生帯上の境界では鉛直方向における運動量輸送について検討を行う。

図-7に $B_c=15\text{cm}$ における植生帯境界付近の移流による運動量輸送を、図-8に $B_c=15\text{cm}$ における植生帯境界付近の流速変動による運動量輸送を示す。いずれも水路中央から右岸側の植生帯境界について注目し、図中には植生帯境界から外側に運動量輸送量が正の値を、内側に負の値をプロットした。植生帯内側および外側境界について見てみると、流速変動による運動量輸送に比べ移流による運動量輸送が卓越していることが見てとれる。移流による運動量輸送では、植生高さ付近を除いた鉛直位置において植生域から非植生域へ運動量が運び込まれる様子が伺える。流速変動による運動量輸送では、植生帯両境界の全ての鉛直位置で非植生域から植生域へ運動量が輸送されている。植生帯上境界では、移流による運動量輸送は植生域から非植生域へ、流速変動による運動量輸送は非植生域から植生域へ運動量が運び込まれている。

図-9に $B_c=0, 3, 15$ および $21\text{cm}$ における植生帯境界付近の全運動量輸送を示す。 $B_c=3\text{cm}$ に注目すると、植生帯外側境界に比べ、内側境界では運動量輸送が極端に抑えられている。 $B_c=15\text{cm}$ では植生帯内側と外側の両境界において同程度の運動量輸送量をとる。 $B_c=21\text{cm}$ においても植生帯外側境界と内側境界が同様の値となるが、これは図-5の二次流ベクトルをみてもわかるように、植生帯外側境界でも内側境界と同様に移流による運動量輸送量が大きくなるためである。植生帯上における全運動量輸送の分布に注目すると、各ケースとも類似の分布をとり、植生帯の距離の違いによる変化はほとんど見られない。そのため、植生帯内側および外側両境界で運動量輸送量が大きくなる $B_c=15\text{cm}$ において、最も運動量輸送が活発となる。このことから、植生帯境界における運動量輸送が活発となる条件下において、流れの抵抗が大きくなることが明らかになった。

## 5. おわりに

本研究では、越流状態において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について詳細な検討を試みた。得られた知見を列挙する。

- (1) 植生帯間の距離の違いによる抵抗特性を粗度係数 $n$ により表現すると、いずれのケースにおいても植生帯間の距離と水深の比 $B_c/H$ が約 $1.5 \sim 1.8$ 付近において $n$ 値が最大値をとる。これは非越流状態と類似した結果となった。
- (2) 水面変動特性については、植生帯中央1列配置に比べ、 $n$ 値が最大値をとった配置では水面変動の振幅が大きくなり、水面変動が活発になることが認められた。
- (3) 二次流特性に注目すると、 $B_c/H$ が約 $1.5 \sim 1.8$ となるような条件下において、水路中央で対をなすロー

ラー状の循環流が最も安定して形成され、その影響により流れの抵抗が大きくなることが示唆された。また、植生帯間の距離が狭い条件下では、水路中央の非植生域において上昇流がみられた。この現象は非越流状態では $B_c/H$ が約 $1.0$ 以下で見られたものの、越流状態では $B_c/H$ が約 $0.4$ 以下でしか認められなかった。これは、越流状態では非越流状態と異なり植生帯上の流れと植生帯間の流れとの運動量の交換が行われることで、植生帯内側境界を中心としたローラー状の循環流が発達しやすくなるためと考えられる。

- (4) 乱れ特性および運動量輸送特性についてみると、越流状態では流速変動による運動量輸送に比べ移流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、植生帯境界における運動量輸送が活発となる条件下において、流れの抵抗が大きくなることが明らかにになった。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二, 成田一郎, 服部隆, 狩野晋一: 洪水時の高茎草本の挙動と粗度係数, 河川技術論文集, 第11巻, pp. 237-242, 2005.
- 2) 清水義彦, 小葉竹重機, 新部隆行: 樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第44巻, pp. 819-824, 2000.
- 3) 渡邊明英, 福岡捷二, 安竹悠, 川口広司: 河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法, 河川技術論文集, Vol. 7, pp. 285-290, 2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 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, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 941-950, 2006.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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/ -31, pp. 33-43, 1995.
- 10) 禰津家久, 鬼束幸樹, 相良幸輝, 池谷和哉: かぶり水深変化による複断面高水敷局辺の乱流構造と河床せん断応力, 水工学論文集, 第43巻, pp. 335-340, 1999.
- 11) 禰津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉: 植生開水路流れにおける水面変動と流速変動との相関, 水工学論文集, 第44巻, pp. 783-788, 1999.

(2006.9.30受付)