

流下方向に不連続的植生群落を有する 開水路流れの抵抗特性と運動量輸送

FLOW RESISTANCE AND MOMENTUM TRANSPORT IN OPEN CHANNEL WITH LONGITUDINALY DISCONTINUOUS VEGETATION

田中貴幸¹・大本照憲²・田中寿幸³

Takayuki Tanaka, Terunori Ohmoto and Toshiyuki Tanaka

¹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)

²正会員 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (同上)

³学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

Vegetation communities are often observed to grow in stripe pattern or patches within many stream channels. In such a situation, hydraulic engineers should examine an appropriate vegetation management system paying attention to flood control and vegetation ecosystem. In this paper, the flow resistance and momentum transport in open channel flow with discontinuous vegetation in longitudinal direction were examined experimentally. Velocity fluctuations were measured using a particle-image-velocimetry (PIV). Results showed that the flow resistance significantly depended on the longitudinal length of cavity between vegetation zones and the reason could be explained by the difference of momentum transport through the interaction among main flow, discontinuous vegetation and cavity.

Key Words : *discontinuous vegetation, flow structure, momentum transport, PIV*

1. はじめに

河川における植生は豊かな生態環境を育み、親しみやすい水辺環境を醸成することから、河道設計・整備において植生の在り方が重要視されている。実河川において植生は流下方向に連なって群落を形成している様子が多々みられるが、河川の多様性や生態系の連続性、植生群落内が死水域となることによる水質悪化の懸念など、諸問題を考慮すると主流部と流れの交換が促進されるような領域を設けることが望ましい。また、植生は流水抵抗増大の要因となることから、自然繁茂した植生をどのように伐採すればいいかなど、植生管理上においても流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れの抵抗特性や流動機構について検討する必要がある。

このような流況に関する基礎的研究として、関根ら¹⁾は植生群落を低水路河岸に左右交互に配置した場合における流れ場の特性と、それに伴う河床変動について検討を行った。これにより、透過性をもつ植生群落の存在により、水位の高い植生群落前面付近から相対的に水位の低い植生域の外側の領域に向かって、植生を避ける、あるいは横切るような流れが生じ、滞りが蛇行する流れが

生成されること、これに伴い洗掘域と砂州域とからなる特徴的な河床が形成されることを明らかにした。

また、流下方向における植生群落間の非植生域は凹部として捉える事ができる。これまでに周囲が固体壁に囲まれた凹部を有するようなわんど流れについては、アスペクト比（開口部長さ/奥行）の違いや植生が凹部に与える影響など、様々な研究が多々行われている^{2,3)}。その中で、浸透性を有するわんど流れに関して、瀬津ら⁴⁾は浸透流を導入したわんど流れ周辺での流れの特性および物質交換特性に関する可視化実験を行った。実験条件として浸透パターンと浸透流量を変化させ、各ケースにおけるわんど内部で発生する渦構造について検討を行った。

このように、透過・不透過性の凹部流れに関する流動機構の検討は行われているものの、植生群落が流下方向にどのような間隔において水深が増減するのか、といった凹部の流下方向長さの変化に伴う流れの抵抗特性に関する研究は未だ検討がなされていない。

そこで、本研究では流下方向において、植生群落間に非植生域である凹部を有する流れに関して、その凹部の流下方向長さを変化させたときの流れの抵抗特性と流動機構について検討を行った。その中で、本論では水深が植生高さより低い非越流状態に注目した。得られた知見

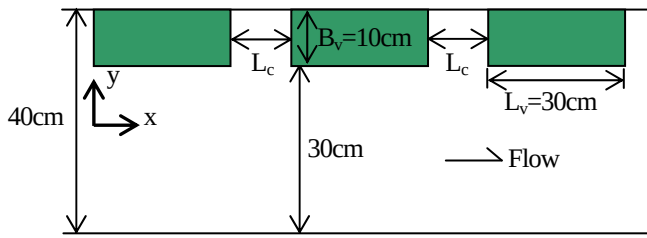


図-1 実験水路概要

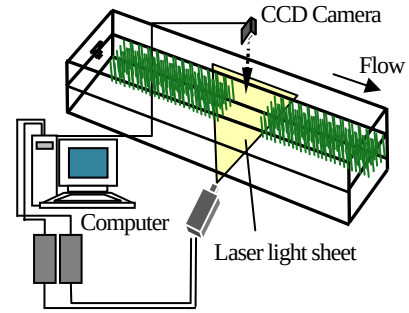


図-2 PIVシステム概要

表-1 実験条件

植生帯幅 $B_v(\text{cm})$	凹部の流下方向長さ と植生帯幅の比 L_c/B_v	植生帯の流下 方向長さ $L_v(\text{cm})$	流量 $Q(\text{l/s})$	水路勾配 I	植生高さ $H_v(\text{cm})$	植生直径 $d(\text{mm})$
10	0~5.0	30	5,6	1/500	5.5	0.242

は植生の管理上、非常に有用性が高いものとする。

2. 実験装置および実験方法

実験は全長10m、幅 $B=40\text{cm}$ 、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。植生帯の模型にはプラスチック板に水流に追従して撓む $\phi 6.10$ 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5.5cmの高さに揃え、0.5cm間隔で貼り付けたものを使用し、左岸側壁面に沿って植生帯を設置した。植生帯幅は $B_v=10\text{cm}$ とし、植生帯の流下方向長さは $L_v=30\text{cm}$ に設定した。図-1のように非植生域である凹部の流下方向長さを L_c とし、この凹部の流下方向長さと植生帯の幅の比を $L_c/B_v=0 \sim 5.0$ と流量一定という条件の下で変化させていく。ここで、 $L_c/B_v=0$ では植生帯が流下方向に一樣に連なっている状態を示す。本実験ではマクロ的視点において流れの平衡状態を形成するため、流下方向に植生帯と凹部を交互に水路上流端より100cm~840cmの位置まで設置している。このとき、凹部の流下方向長さを長くしていくと、水路全体における植生域の割合は減少していく。実験条件は表-1のように設定した。座標系は植生帯先端における水路中央の底面を原点とし、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。本実験では水路に対して植生帯および凹部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。水深の計測にはポイントゲージを用いた。このとき、水深の計測位置は水路中央とし、水深が流下方向にほとんど変化しない領域において、流下方向に平均した水深の値を採択した。本研究ではいずれのケースにおいても植生が水没してい

ない非越流状態を対象としている。

流動機構の検討においてはPIV (Particle Image Velocimetry)法により流速の多点同時計測を行った。PIV (図-2参照)は光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザー（出力25mj）を用い、シート光の厚さを1mm、パルス間隔を500 μs に設定し、水路右岸から左岸に向かってレーザーを照射した。レーザー光とCCDカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は15fps (frame per second)、960 $\times$ 1018 (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され、PIV法によって処理された。流速のサンプリング周波数は15Hz、トレーサーとして粒径5 μm 、比重1.02のナイロン粒子を使用し、アルコール液で十分に攪拌して水中に一樣に混入した。PIVの計測対象領域は水平面において $x=300\text{cm} \sim x=400\text{cm}$ の範囲内であり、鉛直位置は半水深にて計測を行った。1計測面での画像データは1000枚、計測時間は66.7sであった。

本論では非植生域である凹部の流下方向長さを凹部長さと呼び、さらに流下方向において、横断方向に植生帯を有する領域を植生域、植生帯を有さない領域を凹部域と呼ぶことにする。

3. 抵抗特性

図-3は凹部の流下方向長さの変化に伴う水深変化について表したものである。凹部長さ L_c は植生帯幅 B_v で、水深 H は植生高さ H_v で無次元化している。図-4は凹部長さの変化に伴う流れの抵抗特性を粗度係数 n を用いて評価したものである。粗度係数 n の算出方法はこれまでの著者らの研究⁵⁾と同様である。

植生帯が流下方向に連なった状態である $L_c/B_v=0$ から流下方向に非植生域を設け、その非植生域である凹部長さ

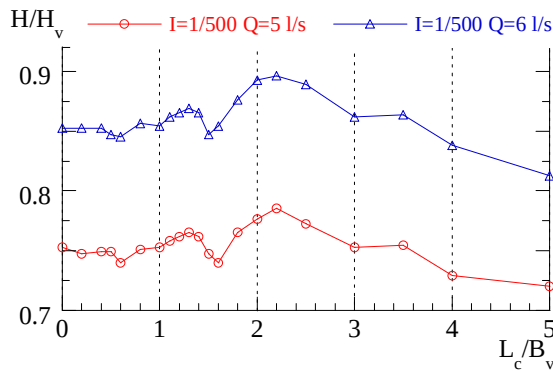


図-3 凹部の流下方向長さの変化に伴う水深変化

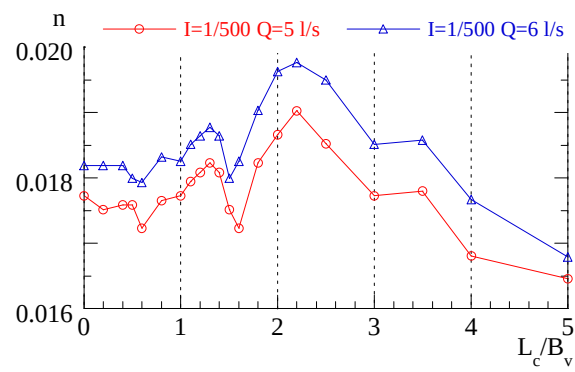


図-4 粗度係数n

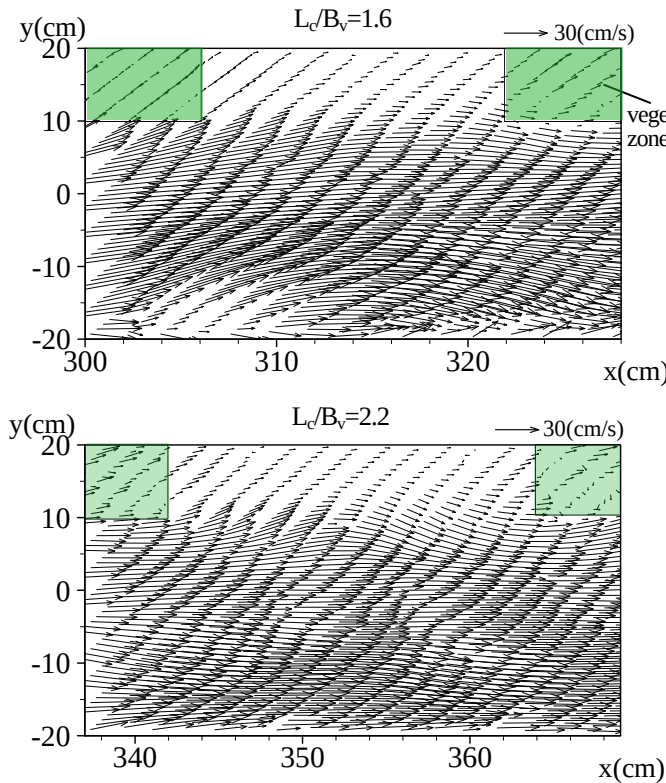


図-5 平均流速ベクトル

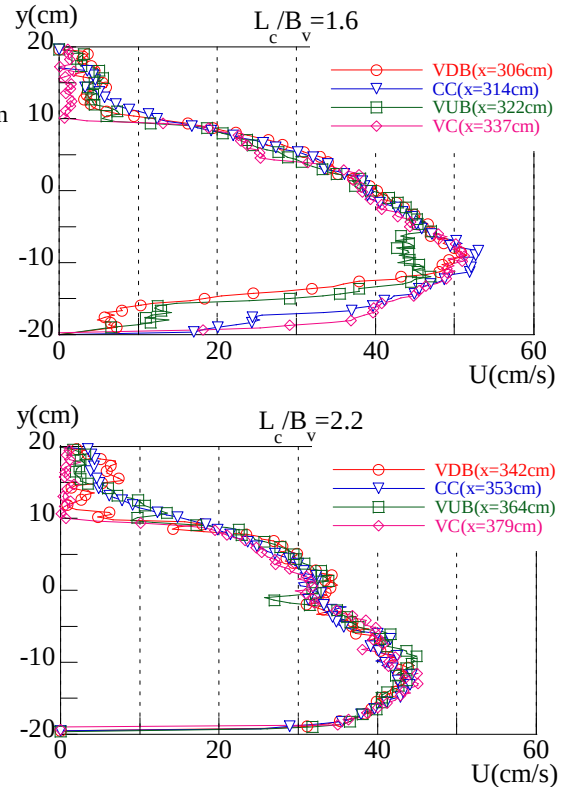


図-6 主流速Uの横断方向分布

を長くしていく。始めのうちは、水深はわずかな減少がみられるものの、同様な水深を示しているが、 $L_c/B_v=0.9$ 付近から水深が徐々に上昇していき、 $L_c/B_v=1.3$ で一度ピーク値をとる。その後水深は $L_c/B_v=1.6$ まで減少傾向を示すが、さらに凹部長さを長くすると再度水深は上昇していき、 $L_c/B_v=2.2$ において水深が最大値をとる。このときの水深は $L_c/B_v=0$ における水深よりも高い値を示しており、粗度係数 n は10%程度上昇していることが認められる。これは $L_c/B_v=0$ に比べ $L_c/B_v=2.2$ では水路全体における植生の割合が減少しているにも関わらず、流れの抵抗は増大していることを示している。さらに凹部長さを長くすると水深は減少していき、 $L_c/B_v=4.0$ 以降では $L_c/B_v=0$ よりも流れの抵抗が明らかに小さくなっていくことが確認できる。このような流れの抵抗特性から、植生管理を行う上で、ただ単に植生を伐採すれば流下能力が向上す

るということではなく、植生群落と非植生域の幅や流下方向長さなどの比率についてしっかりと考慮した上で河道整備を行う必要があることが示唆された。

4. 流動機構

流下方向において、植生帯間における凹部長さを変化させると、凹部および植生帯内外における運動量輸送特性が変化し、その変化が流れの抵抗特性に大きく影響を及ぼすことが予想される。そこで、流量 $Q=6$ l/sの下、凹部長さを長くしたときに始めにピーク値をとった $L_c/B_v=1.3$ 、その後水深が極小値を示した $L_c/B_v=1.6$ 、水深が最大値をとった $L_c/B_v=2.2$ のケースについて、詳細な流動機構の検討を行った。

(1) 平均流速分布

図-5に $L_c/B_v=1.6$ および2.2における時間平均した流速ベクトルを、図-6に同様のケースにおける主流速の横断方向分布を示す。主流速分布では、流下方向において、植生域から凹部域に移る境界(VDB)、凹部中央(CC)、凹部から植生域に移る境界(VUB)、植生帯中央(VC)に注目した横断方向分布を示している。

いずれのケースにおいても、主流速 U は水路中央より右岸側で最大値を示しており、植生帯および凹部を有する領域においては、主流速が極端に抑えられている様子が伺える。また、いずれも植生帯および凹部と主流部との境界付近において主流速が急激に変化しており、この境界付近を通して運動量の交換が活発に行われていることが示唆される。その他のケースに比べ水深が小さな値を示した $L_c/B_v=1.6$ では、 $L_c/B_v=2.2$ に比べ主流速の最大値が大きな値を示すことが認められる。

平均流速ベクトルをみると、いずれのケースにおいても凹部内では流向は流下方向を示しており、わんど流れにみられる凹部内に発生する循環流⁶⁾は形成されないことが認められる。これは植生帯が透過性であることから、凹部内における流れがそのまま植生帯内に進入するためである。また、各ケースとも凹部上流側では主に主流部から凹部内へ向かう流れが確認されるが、 $L_c/B_v=1.6$ では凹部長さが短いことから凹部内における流速が発達せず、主流部との水交換が $L_c/B_v=2.2$ に比べあまり活発でない様子が見て取れる。これは図-6において $L_c/B_v=1.6$ の凹部内の主流速が $L_c/B_v=2.2$ に比べわずかに小さな値を示すことから読み取れる。このことは、 $L_c/B_v=1.3$ においても $L_c/B_v=1.6$ と同様の結果となることを確認した。 $L_c/B_v=2.2$ においては、植生帯および凹部と主流部との境界付近において、凹部中央付近を境に流れが主流部および凹部内を蛇行して流下する様子がはっきりと伺える。また、凹部下流側においては、いずれのケースにおいても植生帯が水衝部のような働きをすることから植生帯主流側先端付近において凹部内からの剥離流が確認できる。ここで、図-6の $L_c/B_v=1.6$ では右岸側においてVUBおよびVDBで主流速の減速がみられる。この現象は $L_c/B_v=1.3$ でもみられたことから、凹部の存在が右岸側の流況にも影響を及ぼしていることが認められる。さらに、 $L_c/B_v=2.2$ では水路中央において主流速が極小値を示す様子が伺える。これは二次流といった三次元的流れの影響によるものであることが予想される。このため、三次元構造を含めた流況に関してより詳細な検討を今後行っていく必要がある。

(2) 乱れ特性

主流速の横断方向分布により、植生帯および凹部と主流部との境界付近において主流速が急激に変化することから、この境界付近において運動量が活発に交換されることで流れ場に大きな影響を与えていることが予想される。そこで、図-7に $L_c/B_v=1.3, 1.6$ および2.2についての、

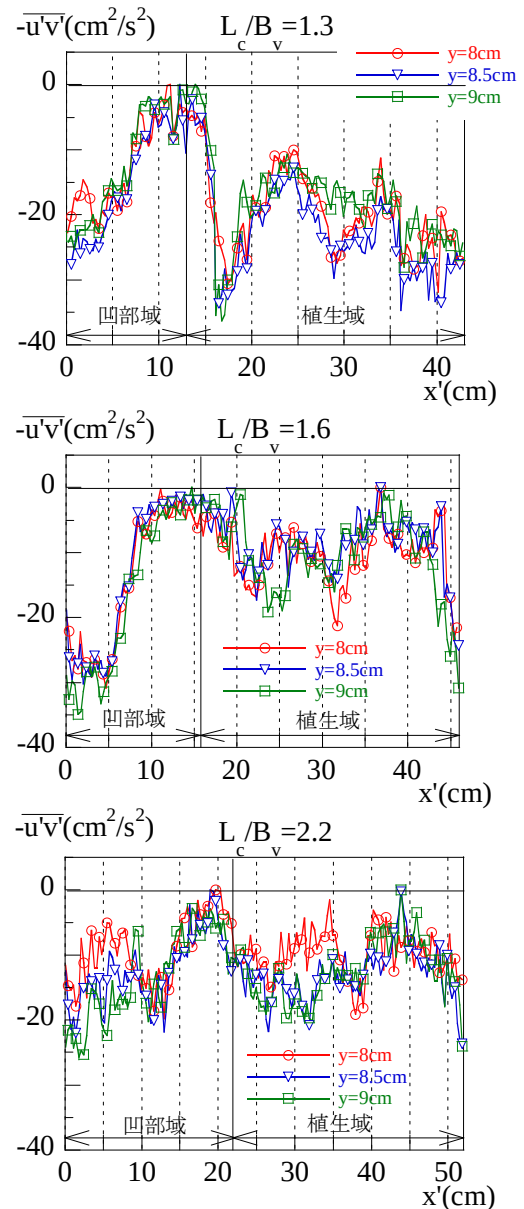


図-7 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の流下方向変化

植生帯および凹部と主流部との境界付近におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の流下方向変化を示す。ここで、横軸は計測範囲内における凹部上流端を $x'=0\text{cm}$ と設定した。いずれのケースにおいても凹部域、植生域ともに $-\overline{u'v'}$ はほぼ負の値を示し、乱れによる運動量は主流部から凹部および植生帯内に運び込まれている様子が伺える。凹部上流側および中央付近ではいずれのケースにおいても凹部下流側に比べ大きな値を示している様子が見てとれる。その傾向はわんど中央付近においてレイノルズ応力が大きな値を示すわんど流れにおけるレイノルズ応力分布と類似している⁷⁾。これは、せん断不安定による渦が生じるためであり、 $-\overline{u'v'}$ の分布傾向は図-6において主流速の横断方向勾配がVUBに比べVDBが大きくなることから推察できる。植生域では、 $L_c/B_v=1.3$ では全植生域において $-\overline{u'v'}$ が同程度の値を示しているが、凹部長さを長くし

たその他のケースでは、植生域において $\overline{u'v'}$ の値が植生带上流端から5cm程度下流の位置で極値をとり、そこから植生域上流側および下流側に向かうにつれ $\overline{u'v'}$ の値が減少していく様子が伺える。このような傾向から、凹部域が広い状態に比べ、狭い状態において乱れによる運動量輸送は活発に行われていることが示唆される。

(3) 移流特性

図-8に各ケースにおける移流による運動量輸送 UV を示す。各ケースとも凹部および植生帯と主流部との境界付近における値である。いずれのケースにおいても移流による運動量輸送量の絶対値は、乱れによるものと比べ明らかに大きな値を示していることが確認できる。これにより、流下方向において植生群落間に非植生域である凹部を有する流れにおいては、乱れによる運動量輸送に比べ、移流による運動量輸送が卓越することが明らかになった。凹部域に注目すると、凹部上流側ではいずれのケースにおいても運動量は主流部から凹部内に運ばれており、凹部下流側では凹部内から主流部に運動量が輸送されている様子が伺える。植生域については、 $L_c/B_v=1.3$ ではほとんどの領域で主流部から植生帯内に運動量が輸送されていることが見てとれる。 $L_c/B_v=1.6$ においては $L_c/B_v=1.3$ と類似した傾向を示すものの、植生帯中央付近において植生帯内から主流部へ運動量が運び出されている様子が伺える。水深が最大値をとった $L_c/B_v=2.2$ に関しては、植生域に関しても凹部域と同様に上流側で主流部から植生帯内へ、下流側で植生帯内から主流部へ同程度の運動量の交換が行われていることが確認できる。これにより、 $L_c/B_v=2.2$ では、凹部および植生帯と主流部との境界付近を中心として流れが規則的に蛇行して出入りを繰り返していることが明らかになり、この規則的運動量交換が流れの抵抗を大きくした一つの要因であると考えることができる。また、移流による運動量輸送量は、少なくとも $L_c/B_v=2.2$ までは、凹部の流下方向長さが長くなるにつれて大きな値を示す傾向があることが確認できた。

(4) 全運動量輸送

横断方向の運動量輸送を次式で与える。

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

この移流による運動量輸送 UV と乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ を足し合わせた全運動量輸送により凹部および植生帯と主流部との境界における運動量輸送特性について検討を試みる⁹⁾。

図-9に各ケースにおける全運動量輸送 $UV + \overline{u'v'}$ を示す。いずれのケースにおいても乱れ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から、全運動量輸送の流下方向変化は移流による運動量輸送と同様の挙動を示すことが認められる。水深が最大値をとった $L_c/B_v=2.2$ では移流に関する運動量輸送と同様に、規則的

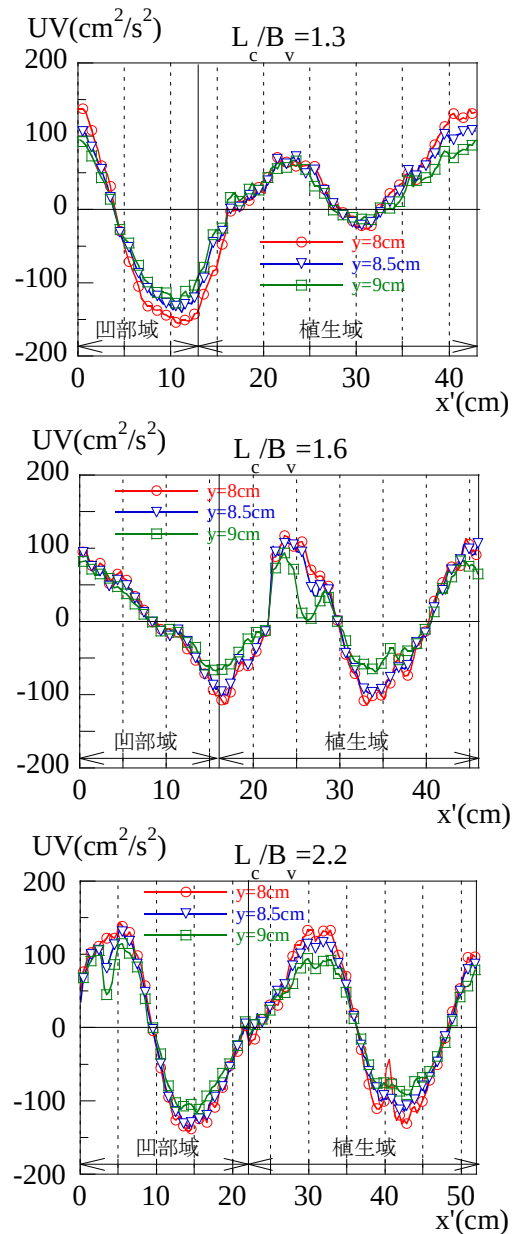


図-8 移流による運動量輸送 UV

に運動量交換がなされており、さらに運動量輸送量の極値はその他のケースに比べ大きくなることが見てとれる。これにより、凹部および植生帯と主流部との境界付近において全運動量輸送量が大きくなるようなケースにおいて、流れの抵抗が最も大きくなることが明らかになった。また、水深が極小値を示した $L_c/B_v=1.6$ では、全運動量輸送量の極値が比較的その他のケースに比べ小さな値を示している。これは $L_c/B_v=1.3$ に比べ乱れによる運動量輸送量が小さくなること、および $L_c/B_v=2.2$ に比べ移流による運動量輸送量が小さくなることが要因と考えられる。これにより、流下方向に植生帯が連なった状態から、水深が最大値をとったケースまで非植生域である凹部の流下方向長さを長くしていくと、乱れによる運動量輸送量は減少していき、移流による運動量輸送量は増大していくことが示唆された。

5. おわりに

本研究では流下方向において、植生群落間に非植生域である凹部を有する流れに関して、その凹部の流下方向長さを変化させたときの流れの抵抗特性と流動機構について検討を行った。今後、水面変動特性や流れの三次元的挙動などについても詳細に検討していく次第である。本研究によって得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 非植生域である凹部の流下方向長さを長くしていくと、水深は一度極大値を示した後に減少していき、凹部長さと植生帯幅の比 $L_c/B_v=1.6$ で極小値をとる。そこからさらに凹部長さを広げると水深は上昇して $L_c/B_v=2.2$ で最大値を取り、それ以降は減少していく、という一連の流れの抵抗特性を明らかにした。また、水深が最大値をとった $L_c/B_v=2.2$ では、植生帯が流下方向に連なっている $L_c/B_v=0$ と比べ、水路全体における植生の割合が減少しているにもかかわらず、粗度係数 n が10%程度大きくなることが明らかになった。
- (2) 平均流速ベクトルに注目すると、植生帯が透過性であるため、凹部内では周囲が固体壁に囲まれたわんど流れに見られる循環流は形成されず、流れがそのまま植生帯内に進入する様子が確認できた。また、凹部長さが長くなると、短い状態に比べ主流部との水交換が活発となることが確認できた。
- (3) 本研究のように流下方向に不連続な植生帯を有する流れでは、乱れによる運動量輸送に比べ、移流による運動量輸送が卓越することが明らかになった。また、流下方向に植生帯が連なった状態から、水深が最大値をとったケースまで非植生域である凹部の流下方向長さを長くしていくと、乱れによる運動量輸送量は減少していき、移流による運動量輸送量は増大していくことが示唆された。
- (4) 水深が最大値をとった $L_c/B_v=2.2$ では、凹部および植生帯と主流部との境界付近において運動量輸送が最も活発となることが明らかになった。また、その境界付近を中心として流れが規則的に蛇行して出入りを繰り返していることが明らかになり、この規則的運動量交換が流れの抵抗を大きくした一つの要因であることが示唆された。

参考文献

- 1) 関根正人, 浦塚健史: 側岸部に交互に繁茂する植生群落によって生成される流れと河床形状について, 水工学論文集, 第44巻, pp.813-818, 2000.
- 2) 中川研造, 河原能久, 玉井信行: ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.595-600, 1995.
- 3) 富永晃宏, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構に与えるわんど形状と植生の影響に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.517-522, 2003.
- 4) 禰津家久, 矢野勝士, 光成洋二: 浸透性を有するワンド流れ周辺

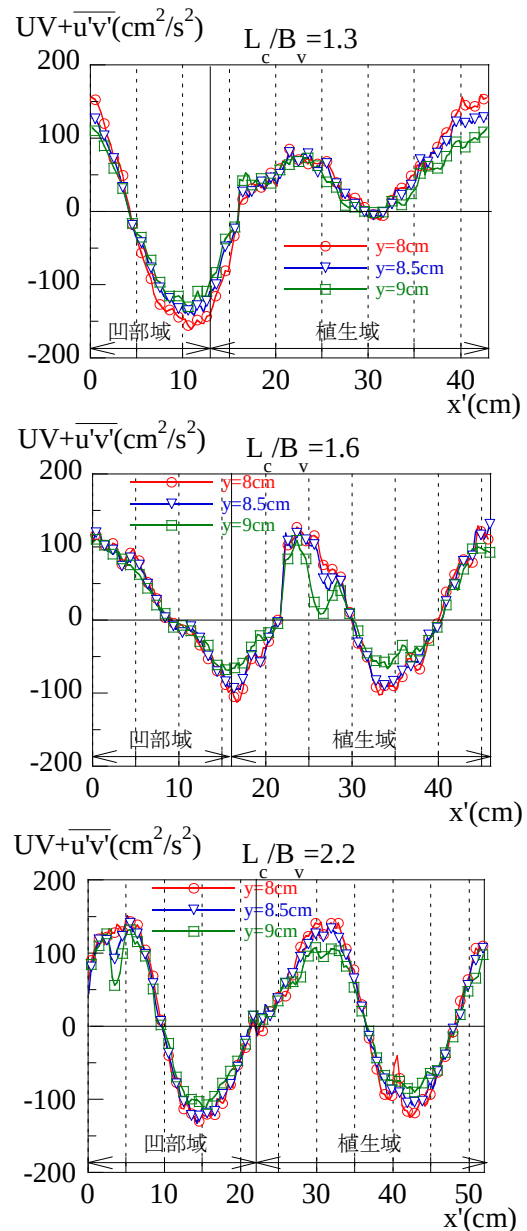


図-9 全運動量輸送 $UV+\overline{u'v'}$

の物質交換特性に関する可視化実験, 水工学論文集, 第48巻, pp.541-546, 2004.

- 5) 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.
- 6) 禰津家久, 鬼塚幸樹, 池谷和哉, 高橋俊介: わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究, 応用力学論文集, Vol.3, pp.813-820, 2000.
- 7) 富永晃宏, 谷川幸男, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構とその制御法に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.571-576, 2002.
- 8) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 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, 水工学論文集, 第51巻, pp.703-708, 2007.

(2007. 9. 30受付)