

# 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

INTERACTION BETWEEN FREE SURFACE OSCILLATION AND VELOCITY  
FLUCTUATIONS IN OPEN-CHANNEL FLOW WITH VEGETATION ZONE

大本照憲<sup>1</sup>・田中貴幸<sup>2</sup>・矢北孝一<sup>3</sup>

Terunori OHMOTO, Takayuki TANAKA and Kouichi YAKITA

<sup>1</sup>正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

<sup>2</sup>学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

<sup>3</sup>正会員 熊本大学環境システム工学科 (同上)

Laboratory experiments were conducted using a two-component electromagnetic current-meter and a particle-image-velocimetry (PIV) to clarify the interaction between main flow and flexible artificial vegetation, which was attached to the central bottom of an open channel. In addition, interception plate 1mm thick was placed at the one-sided vegetation interface along the main flow direction.

Results show that in the main flow region of the equilibrium state, horizontal components of the secondary currents take the directions toward the vegetation zone near the bottom and toward the non-vegetation zone near the surface. From the measurements, it was shown that this thin plate significantly suppressed water surface oscillations, horizontal periodical velocity variations and spanwise momentum transport from main flow region to vegetation zone.

*Key Words* : vegetation, water surface oscillations, momentum transport, transverse mixing, PIV

## 1. はじめに

多自然型河川工法や再自然化工法が広まる中で、中小河川の河道計画においても植生群落が生かされる機会はますます増えつつある。

治水や環境機能を高めるためには、植生群落の流れに対する抵抗特性や運動量・物質の輸送特性に与える影響について把握する必要がある。また、植生の揺動や水面変動は植生帯境界を通して運動量・物質の交換を促進し、植生帯周辺における乱流構造を変化させることが予想され、河床変動や土砂輸送にも影響することが考えられる。

植生帯を伴う流れの構造についてはこれまで多くの研究がなされているが、その大半は側岸に植生帯を設置した場合や、模擬植生に剛直な円柱や多孔質体が用いられることが多く、中小河川の中央部に帯状に連なった比較的浅い流れに見られる沈水性の植物群落を対象にした研究事例は少ない。さらに、植生帯を伴う開水路流れにおいて水面変動や二次流、乱れ特性に与える影響につ

いて十分な検討がなされていないとの指摘<sup>1)</sup>もある。

宮本ら<sup>2)</sup>は水表面の変動を伴う流れを対象として、PIV計測から得られた可視化断面画像を処理することによって、瞬間的な水面形状と流速分布とを同時計測する手法を提示し、水面変動を伴う凹部での流れの特性を明らかにした。

著者ら<sup>3, 4)</sup>は、水路中央部に設置した有限幅の植生帯上に越流がある場合、安定した二次流が発生し、この二次流は乱流構造に大きな影響を与えることを指摘した。また、植生帯上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示した。さらに、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。しかし、植生帯を横断する流れが水面変動や運動量輸送特性にどのような影響を及ぼすかについては十分に検討がなされていない。

そこで、本研究では流れの境界条件として水路中央部に有限幅の柔軟な模擬植生帯を設置し、さらに植生帯境

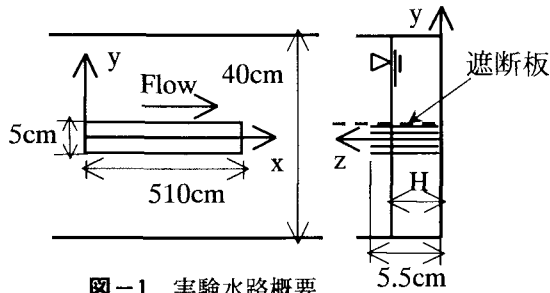


図-1 実験水路概要

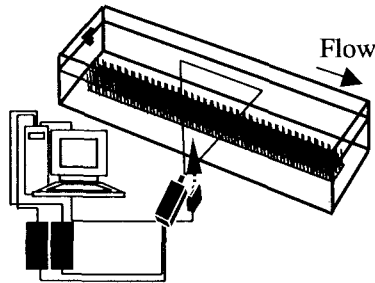


図-2 PIV システムの概要

界面の一方には横断方向の流速成分を阻止するために主流に平行に遮断板を直立させた。

本研究では、この遮断板は水面変動を抑制し、横断方向の運動量輸送を制限し、流れをコントロールすることを明らかにした。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は長さ 10m、幅 40cm、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。植生帯のモデルには 5cm×30cm×0.3cm の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  $H_v=5.5\text{cm}$  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 350cm の位置から 510cm に渡って水路中央に設置した。座標系は植生帯先端の水路中央部底面を原点とし流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直上方に 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。遮断板はアクリル製で、厚さ 2mm のものを全植生帯左岸側に垂直に立て、上下端とも固定し、流れに対して変形しないようにした。実験水路概要を図-1 に示す。また、表-1 のように計 4 ケースについて境界条件を設けた。なお、遮断板による水深の変化は非常に微小であったため、抵抗体として考慮しないものとする。

実験は水面変動と流速の同時計測、流速の多点同時計測を行った。流速の単点の計測には電磁流速計を、水面変動の計測には超音波水位計を用い、流速の多点同時計測には面的な範囲で測定が可能である PIV (Particle Image Velocimetry)法を用いて行った。電磁流速計と超音

表-1 実験条件

	A1	A2	B1	B2
流量 Q(l/s)	5.6	5.6	12.4	12.4
水深 H(cm)	5	4.4	8.5	8.3
断面平均流速 $U_m$ (cm/s)	28.0	31.8	36.5	37.3
遮断板の有無	無し	有り	無し	有り
水路勾配 I	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
植生帯高さ $H_v$ (cm)	5.5	5.5	5.5	5.5
植生直径 d(mm)	0.242	0.242	0.242	0.242
Fr 数	0.40	0.48	0.40	0.41
Re 数	12000	12000	27000	27000

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。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、パルス間隔から左岸側に向かって、縦断面の計測時には水路床から水面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 30fps (frame per second)、960×1018 (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 30  $\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。PIV の計測対象領域は水平面においては  $x=312.5\text{cm} \sim x=320.0\text{cm}$ 、 $y=-2.5\text{cm} \sim y=-10.0\text{cm}$  の  $7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm}$  とし底面付近の  $z=1.1\text{cm}$  ( $z/H_v=0.2$ )、半水深付近の  $z=2.8\text{cm}$  ( $z/H_v=0.5$ )、水面付近の  $z=4.3\text{cm}$  ( $z/H_v=0.8$ ) の 3 個所で、縦断面においては  $y=-3.0\text{cm}$  で、領域は  $x=312.5\text{cm} \sim x=320.0\text{cm}$ 、 $z=0\text{cm} \sim z=0.9H_{cm}$  の  $7.5\text{cm} \times 0.9H_{cm}$  とし植生帯近傍の 1 個所で各ケース計測を行った。表-1 に実験条件を示す。

## 3. 実験結果

### (1) 水面変動と流速変動の同時計測

図-3 は水面変動と流速変動の同時計測による時系列データである。超音波水位計を  $x=315.0\text{cm}$ 、 $y=-3.0\text{cm}$  の植生帯境界に設置し、電磁流速計も同じ位置の  $z=2.5\text{cm}$  に設置して計測を行なった。水面変動と流速変動の周期性について、その傾向は各々において鉛直方向に共通したものであるため、流速変動のデータは植生帯の鉛直中心付近のもので代表させた。図-4 は水面変動と流速変動の同時計測を行なったときの自己相関係数<sup>4)</sup>である。図-3、4 より、非越流型の A1 では水面変動、主流速方

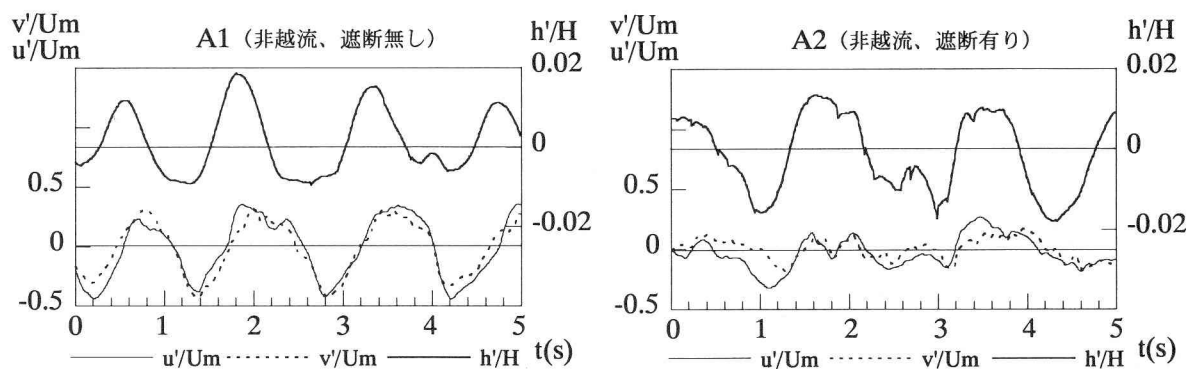


図-3 水面変動と流速変動の時系列

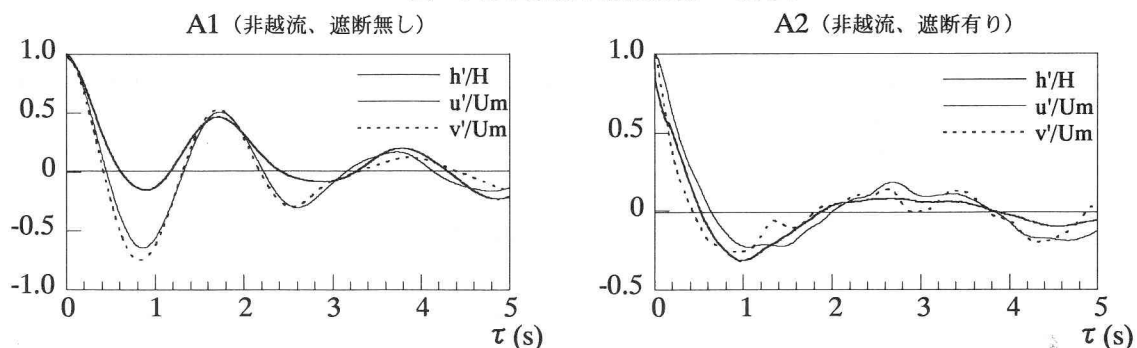


図-4 水面変動と流速変動の自己相関係数

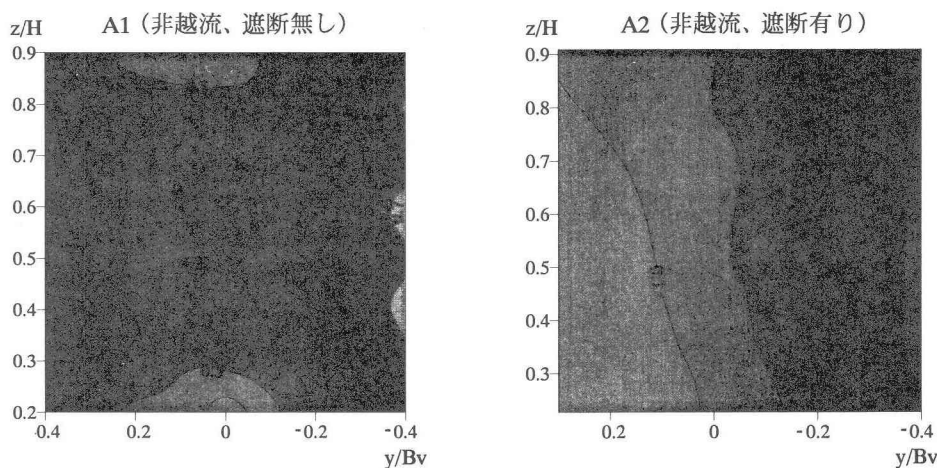


図-5 植生帯内における主流速  $U/Um$  の等値線

向の変動成分、横断方向の流速成分の周期はサードピークがいずれも 1.72s と同一周期で非常に高い相関をもつ。しかし、遮断板を設けた A2 では水面変動のサードピークが 2.63~2.66s であり、A1 と比べ周期が長くなり、相関係数も低くなっている。A2 における主流速方向の変動成分と横断方向の流速成分においては波形が不規則で周期の把握が困難となっている。また、その振幅は A1 と比較して約 50%減少しており、遮断板による影響が顕著に表れている。

## (2) 平均流特性

### a) 植生帯内の横断面における主流速 $U/Um$ の等値線

図-5 に I 型電磁流速計を用いて計測した主流速  $U/Um$  の等値線図を示す。鉛直方向には各平均水深  $H$  で、横断方向には植生帯幅  $B_v$  で無次元化した。電磁流速計

は鉛直方向及び横断方向ともに 5mm 間隔で計測を行った。その際、池田ら<sup>9)</sup>は模擬植生の一部を切り抜きピト管と 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。

A1 において、主流速  $U/Um$  は植生帯中央から横断方向に増加していき、植生帯両境界で断面平均流速の約 65~70%で最大値を取る。そして植生帯中央から鉛直方向には減少していき、植生帯中央の底面付近と水面付近で断面平均流速の約 45~50%で最小値を取る。左岸側の植生帯境界に遮断板がある A2 においては鉛直方向に比べ横断方向の主流速変化が卓越しており、流れが二次元的になっている。A2 と比較して A1 は植生帯中央部でも主流速が大きく、非植生帯からの運動量輸送が大きいこ

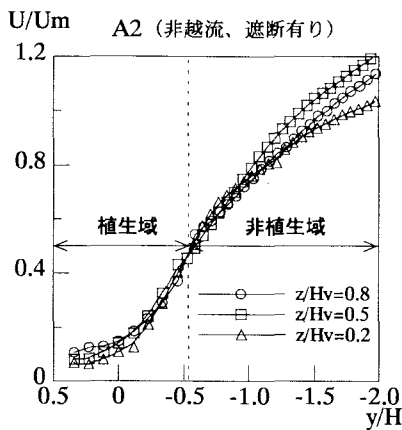
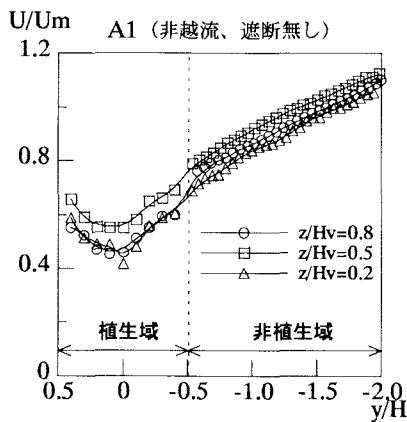


図-6 主流速  $U/Um$  の横断方向変化

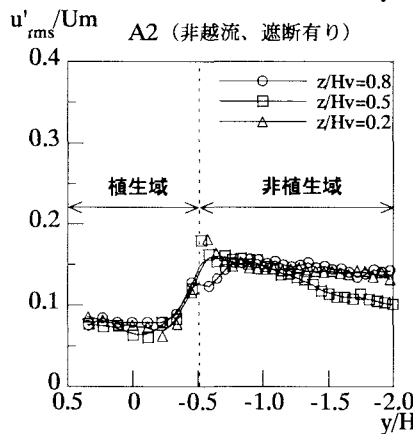
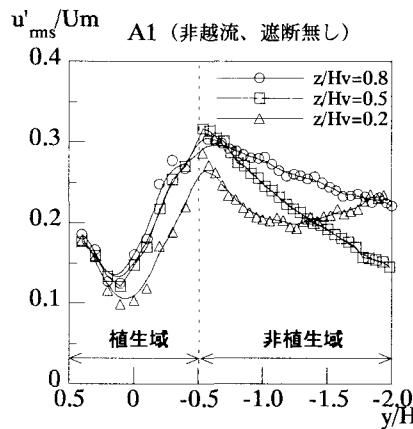


図-7 主流速の乱れ強度  $u'_{rms}/Um$  の横断方向変化

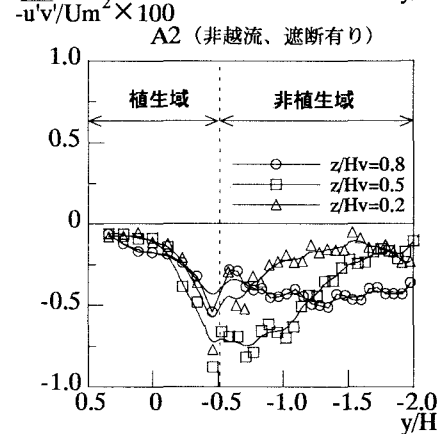
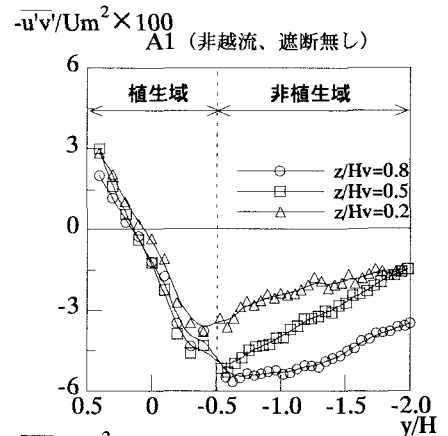


図-8 レイノルズ応力  $\overline{-u'v'}/Um^2$  の横断方向変化

とが伺える。

**b)主流速  $U/Um$  の横断方向変化**

図-6 は左岸側植生帯境界から主流部における主流速  $U/Um$  の横断方向変化で、植生帯高さ  $H_v$  の 20% (底面付近)、50% (半水深付近)、80% (水面付近) の 3 断面を示している。植生帯内は I 型電磁流速計で、主流部は PIV での計測である。

A1、A2 のどちらにおいても植生帯内において主流速は急激に抑えられていることが認められる。今回の実験では全てのケースにおいて植生帯境界で変曲点を持つことが確認された。ここで、池田ら<sup>9)</sup>は植生帯境界では主流速の横断方向分布の変曲点不安定によって流れが不安定となり水平組織渦が発生することを解明し、境界で発生する周期渦について考察を行っている。A1 に比べ A2 では植生帯境界の変曲点における傾きが大きく、植生帯境界付近で流速が急激に変化していると考えられる。

**c)主流速の乱れ強度  $u'_{rms}/Um$  の横断方向変化**

図-7 は左岸側植生帯境界から主流部における主流速の乱れ強度  $u'_{rms}/Um$  の横断方向変化である。A1、A2 ともに植生帯境界で乱れ強度が著しく増大し最大値をとっている。また遮断板を用いることで乱れ強度が境界で

50%程度減少しているのが伺える。植生を有さない開水路流においては、乱れは壁面付近で発生し、壁面から遠ざかるにつれて指数関数的に単調減少する。しかし、植生帯境界域において底面から鉛直方向に乱れ強度が増加していることが確認できる。この傾向は壁面乱流においては見受けられず、植生開水路流れに特有の現象といえる。同様の結果が室田ら<sup>7)</sup>および清水ら<sup>9)</sup>によって報告されている。

**d)レイノルズ応力の横断方向変化**

図-8 は左岸側植生帯境界から主流部におけるレイノルズ応力  $\overline{-u'v'}/Um^2$  の横断方向変化である。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運動量輸送を考える上で重要であり、植生を有する河道設計において重要な水理量である。まずいずれも植生帯境界で負の極値を取り、この位置で運動量の交換が強く行われていることを示している。遮断板を設けた A2 では A1 と比較して右岸側植生帯境界部のレイノルズ応力の極値が約 80%も減少していることが伺える。これにより遮断板を設けることで非植生域と植生域との運動量輸送を抑制していることが示唆される。このレイノルズ応力  $\overline{-u'v'}/Um^2$  が最大値をとる地点は、図-6 で観察されるように主流速の横断方向の勾配  $\partial U/\partial y$  が大きい領域と対応している。つまり植生の存在によって植生内部の流速が

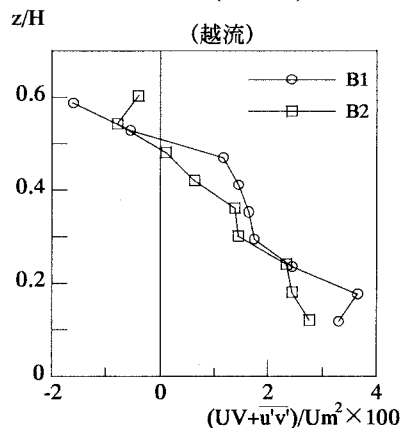
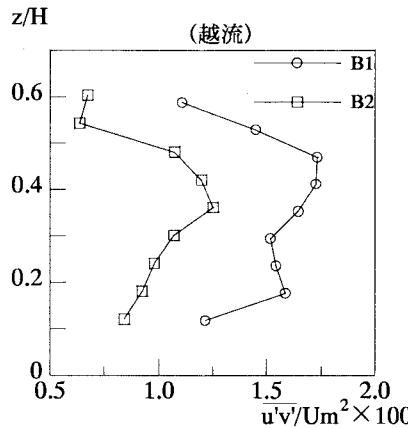
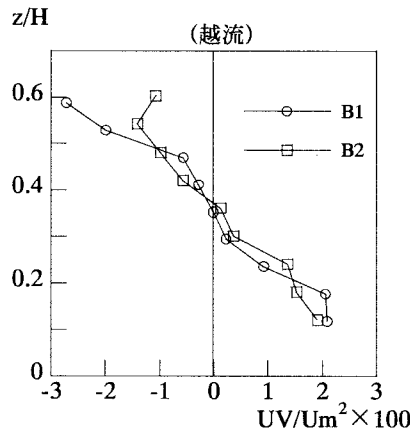
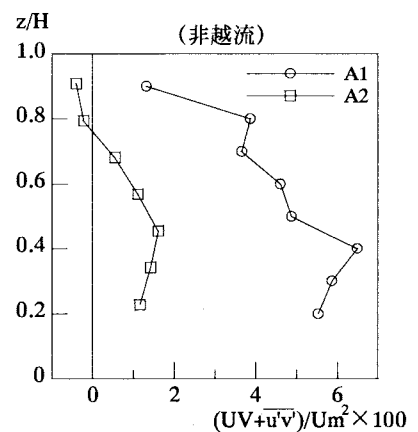
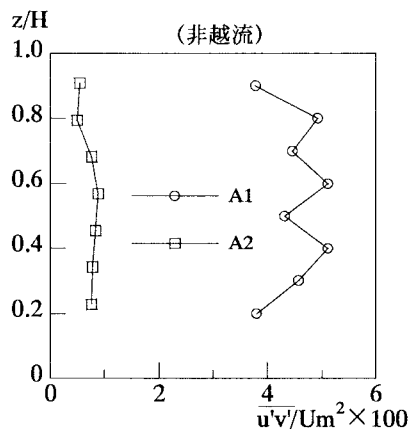
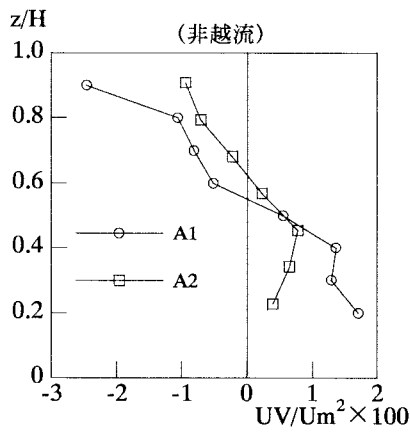


図-9 移流による運動量輸送  $U/U_m$  の鉛直方向変化

図-10 流速変動による運動量輸送  $\overline{u'v'}/U_m^2$  の鉛直方向変化

図-11 運動量輸送  $(UV+\overline{u'v'})/U_m^2$  の鉛直方向変化

低減され、主流部との流速差によって発生する横断方向のせん断応力のためにレイノルズ応力  $\overline{u'v'}/U_m^2$  は増加しているものと考えられる。すなわち、この領域では激しい運動量交換が生じていることになる。ここで図-6、7、8より、A1の方がA2より流速の空間勾配は小さいが、乱れ強度もレイノルズ応力も大きくなっている。これは図-3、4の相関係数から、主流速方向の変動成分  $u'$  と横断方向の流速成分  $v'$  の相関がA2よりもA1が強いことによるものと考えられる。

### e) 植生帯境界における運動量輸送

植生の揺動に伴う乱れによって運動量・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。

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

$UV$  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つの項がそれぞれのケースにおける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-9に植生帯境界における移流による運動量輸送の鉛直方向変化を示す。いずれも植生高さの半分で運動量の符号が相反していることが確認できる。植生帯境界の底面付近では主流部から植生帯へ運動量は運び込まれ、

水面付近では反対に植生帯から主流部へ運動量は運び出されていることを示す。遮断板を用いると運動量は非越流型では減少しているが、越流型は植生高さ付近で違いはあるもののほぼ同程度である。

図-10は植生帯境界における流速変動による運動量輸送の鉛直方向変化を示す。まず、どの条件においても運動量は正の値を取っていることから流速変動による運動量は全て植生帯内に運び込まれていることが伺える。遮断板を設けるといづれも運動量は減少しており、特に非越流型では約80%と顕著である。これにより、遮断板を設けることで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に大きな影響を与えることが示唆された。

図-11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  $(UV+\overline{u'v'})/U_m^2$  の鉛直方向変化である。まず非越流型では、運動量輸送は遮断板を用いていないA1の方が大きく、いずれも底面付近から増加しながら半水深付近で最大値を取り水面付近に向かって減少していく。正の値を取っているため運動量は主流部から植生帯へと運び込まれている。しかし、遮断板を用いたA2では水面付近で負の値を取っているため運動量は植生帯から主流部へと運び込まれている。越流型においても、底面付近から水面付近に向かって運動量輸送は減少していき、遮断板を用いることによって減少するが非越流型ほど顕

表-2 境界混合係数  $f$

	A1	A2	B1	B2
混合係数	0.146	0.011	0.036	0.017

著ではない。

### (3) 植生帯内外の混合特性

図-6より植生帯境界において顕著な主流速の減少が見られ、このような混合をマクロ的な視点から見ると植生帯境界でせん断応力が作用すると考えることができる。そこで植生帯境界における混合を植生帯内外の境界に作用するせん断応力により表現する<sup>9)</sup>。速度差のある流体間に作用するせん断応力 $\tau_v$ は、一般に、式(2)で流速差と結び付けられる<sup>10)</sup>。

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

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $\Delta U$ ：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 $\tau_v$ は図-11の実測データを用いて算出した。

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<sup>11)</sup>。遮断板の存在はこれらに対応し、遮断板が河岸と類似の役割を果たすことが認められる。すなわち、植生帯の両側の流れに相互作用がある流れは、側岸に沿った植生帯流れと本質的に異なり、運動量輸送が高まることが実証されている。

式(2)より求めた境界混合係数 $f$ を表-2に示す。これより、植生帯境界におけるせん断応力、すなわち運動量交換を境界混合係数 $f$ によって定量的に表現することができる。植生帯を横断する流れを遮断することで植生帯境界における運動量交換は、非越流型では約90%、越流型では約50%の減少を示す。また運動量交換は非越流型で非常に活発であり、越流型の運動量輸送の約4倍程度を示す。

## 4. おわりに

本研究では水路中央部に設置した植生帯を横断する流れに注目し、遮断板を用い植生帯境界における法線方向の流れを抑制することで、流れ場に与える水面変動や運動量輸送について検討を行なった。得られた知見を列挙すると以下のとおりである。

1) 植生帯が水路中央に設置された開水路流れにおいて、植生帯境界の流水を遮断すると、非越流型では水面変動の周期が長くなることが明らかになった。また、主流速

方向の流速成分と横断方向流速は周期性が弱まり、振幅は約50%程度低減する。

2) 植生帯内における主流速の横断方向変化は、非越流型において、植生帯境界に遮断板を設けると鉛直方向に比べ横断方向の流速変化が卓越しており、二次元的となる。また、遮断板を設けない場合は、設けた場合と比べ植生帯中央部でも主流速が大きく、非植生帯からの運動量輸送が大きいことが伺える。

3) 植生帯が水路中央に設置された開水路流れにおいて、遮断板を設けると植生帯境界で主流速の乱れ強度 $u'_{rms}/U_m$ は約50%、レイノルズ応力は約80%減少していることが伺える。これにより遮断板を設けることで非植生域と植生域との運動量輸送を抑制していることが示唆される。

4) 植生帯を横断する流れを遮断すると、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に大きな影響を与えることが認められた。それは特に非越流型で顕著に見られる。

5) 植生帯境界における運動量輸送を境界混合係数 $f$ によって定量的に把握することができ、遮断壁を用いると非越流型で約90%、越流型で約50%の低減を示す。これは遮断板の存在によって移流に比べ流速の周期変動が小さくなり、流速変動による運動量輸送が支配的である非越流型の方が相対的に大きく減少することを表している。

## 参考文献

- 1) 福津家久, 鬼束幸樹, 池谷和也: 水工学論文集, 第44巻, pp.783-788, 2000.
- 2) 宮本仁志, 神田徹, 大江和正: 水工学論文集, 第45巻, pp.511-516, 2001.
- 3) 大本照憲, 福井洋幸, 林俊一郎: 水工学論文集, 第42巻, pp.427-432, 2000.
- 4) 大本照憲, 岡本隆之: 水工学論文集, 第47巻, pp.991-996, 2003.
- 5) 池田俊介, 金沢稔, 太田賢一: 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.33-43, 1995.
- 6) 池田俊介, 太田賢一, 長谷川洋: 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.47-54, 1992.
- 7) 室田明, 福原輝幸: 第28回水理講演会論文集, pp.225-230, 1984.
- 8) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次: 土木学会論文集, 第34巻, pp.475-480, 1991.
- 9) 福岡捷二, 藤田光一: 建設省土木研究所報告第180号, pp.133-141, 1990.
- 10) 石川忠晴ほか: 第39回年次学術講演会, 第二部, pp.473-474, 1984.
- 11) 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

(2004.9.30 受付)