

植生群落の配置が開水路流れの抵抗に与える影響

INFLUENCE OF VEGETATION ARRANGEMENT PATTERN ON FLOW RESISTANCE IN AN OPEN-CHANNEL

大本照憲¹・田中貴幸²・矢北孝一³

Terunori OHMOTO, Takayuki TANAKA and Kouichi YAKITA

¹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)

²学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

³正会員 熊本大学環境システム工学科 (同上)

Vegetation community are often observed to grow in stripe pattern or patches within many stream channel. It is necessary to predict or understand stage-discharge relationships and velocity distributions in partially vegetated channel for enhancements of flood protection and river environment.

In this paper, the influence that arrangement patterns of vegetation zones gave to the flow resistance in an open-channel was examined experimentally. The water-surface fluctuations and flow velocity were measured by stage gauge using ultrasonic wave and Particle Image Velocimetry method respectively. Results showed that the relationship between flow depth and discharge significantly depended on the arrangement patterns and the reason could be explained by the difference of momentum transport from the relatively fast flow in non-vegetated zone to the slow flow within the vegetated zone.

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

1. はじめに

従来、治水・利水を目的とした河川工法が主流であったが、近年は生物の生息・生育環境の創出や親水性の高い水辺環境の創出を目的とした多自然型河川工法や再自然化工法が急速に広まりつつあり、植生や樹木が河川環境に果たす役割は大きくなっている。

しかし、植生群落が洪水時の流下能力を低下させるといった治水安全度上のマイナス面を持つことから、河道内の植生が及ぼす影響を適切に評価し、残置・除去、あるいは河岸保護のために設置するといった適切な植生管理を行わなければならない¹⁾。

このような河道内における植生の重要性から、植生を有する開水路流れについてはその密度・剛性・倒伏状況・配置といった様々な観点から多くの研究が行われている。

中矢・池田ら²⁾は側岸に水没した植生が存在する開水路流れ場を対象に、数値計算と水理模型実験により植生密度と運動量輸送の関係について検討を行い、境界せん断応力のピークは自然に繁茂する植生密度より高い密度で生ずることを明らかにした。また、SDS&2DHモデルの計算精度について検討し、広範囲の植生密度に対してモデルが適用できることを明らかにした。

福岡ら³⁾は高茎草本域では倒伏・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。

富永ら⁴⁾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。樹木群密度が同じでもその設置場所の違いにより、抵抗および平均流速分布構造が変化し、特に樹木群が低水路側に近い条件下において抵抗が大きくなり、高水敷側壁側に通常より高速な流れが発生する点を指摘した。また、横断方向運動量輸送式の数値計算により、普遍的な渦動粘性係数を用いて樹木群を有する複断面流れの予測がある程度可能であることを示した。

しかし、単断面開水路流れにおいて、弾性変形を伴う植生群落の配置が抵抗特性に与える影響についてはこれまでほとんど研究がなされていない。

そこで、本研究では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う。単純化された配置の違いによる抵抗特性を明らかにするため、各配置での横断面における植生域と非植生域との割合は同一とした。また、越流状態と非越流状態ではその流動機構が異なることから、今回の実験では非越流状態に

表-1 実験条件

Pattern	水路勾配 I		植生高さ $H_v(\text{cm})$	植生材料	植生直径 $d(\text{mm})$	植生幅 $B_v(\text{cm})$
	1/1000	1/500, 1/300				
	流量 $Q(\text{l/s})$	流量 $Q(\text{l/s})$				
1~4	1~8	1~13	7.5	ナイロン系	0.242	10

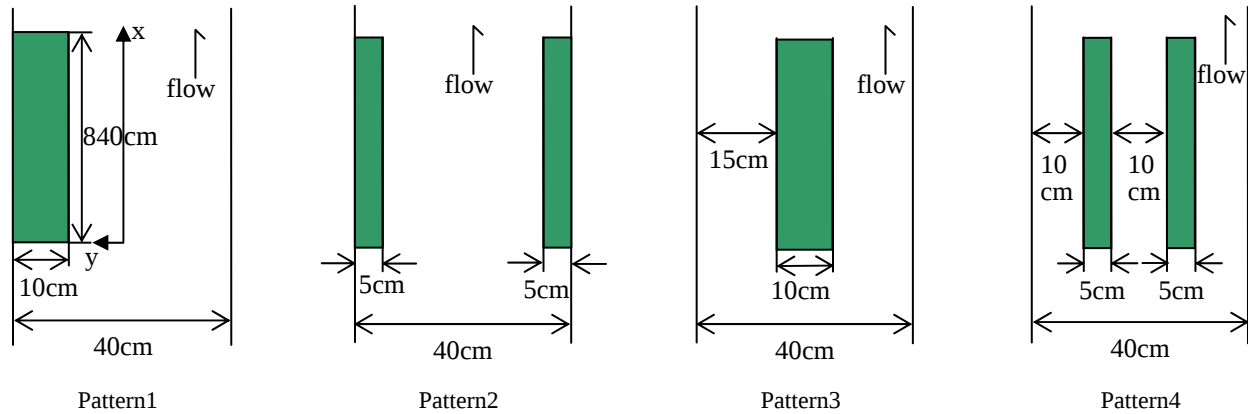


図-1 実験水路概要

ついて詳細に検討を試みた。本研究によって得られた知見は、環境機能と治水機能を両立させる河道整備において有用性が高いものとする。

2. 実験装置及び実験方法

実験は全長 10m、幅 $B=40\text{cm}$ 、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。植生幅は $B_v=10\text{cm}$ とし、配置パターンは図-1 のように設定した。いずれのパターンにおいて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 軸をとり右手系とする。またそれぞれの流速成分を u, v 、平均値を U, V 、変動成分を u', v' と表す。実験条件を表-1 のように設定する。4 つの配置パターンにおいて水路勾配 $I=1/1000, 1/500, 1/300$ でそれぞれ流量を変化させていき、ポイントゲージを用いて水深を計測する。水深は水路下流端のせきを用い擬似等流場を形成して計測を行った。

流動機構の検討においては水面変動の計測、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用いて行い、流速の多点同時計測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。

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。流速の計測時間は 20 秒、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。可視化画像はフレームレート 29.97fps (frame per second)、 720×480 (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 $50\text{cm} \times 40\text{cm}$ として各パターン計測を行った。

3. 抵抗特性

各配置パターンにおいて流量を 1 l/s 間隔で段階的に変化させ、各流量における水深を計測することにより流れの抵抗特性の把握を試みる。図-2 に植生帯の各配置における流量と水深の関係を示す。水深 H は植生高さ H_v で無次元化を行った。Basic は植生帯を配置していない滑面状態を示す。緩やかな曲線を描いているパターンもあるが、何れのパターンにおいても流量の増加とともにほぼ比例して水深も増大している。何れの水路勾配においても水深は Pattern1, Pattern2, Pattern3, Pattern4 の順に大きくなることが確認できる。水深が植生高さより小さい非越流状態に注目すると、 $I=1/1000$ では $Q=3 \text{ l/s}$ 、 $I=1/500$ では $Q=5 \text{ l/s}$ 、 $I=1/300$ では $Q=6 \text{ l/s}$ までが非越流となっている。その流量下では、植生帯を水路片岸に配置した Pattern1 と水路両岸に配置した Pattern2 はほぼ同じ水深をとるが、中央 1 列に配置した Pattern3 と中央 2

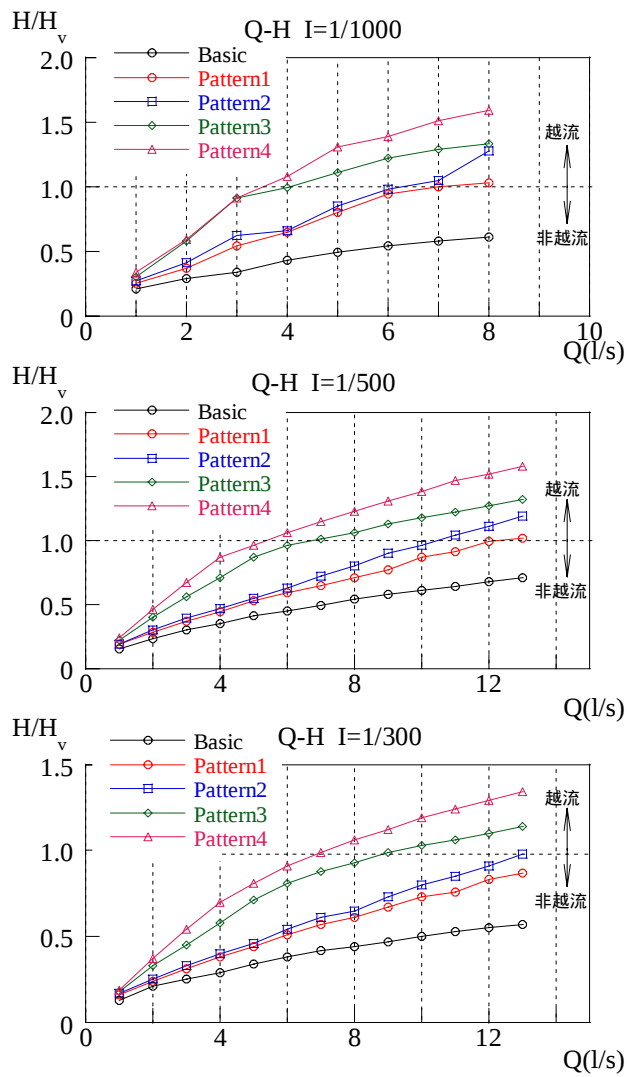


図-2 流量・水深曲線

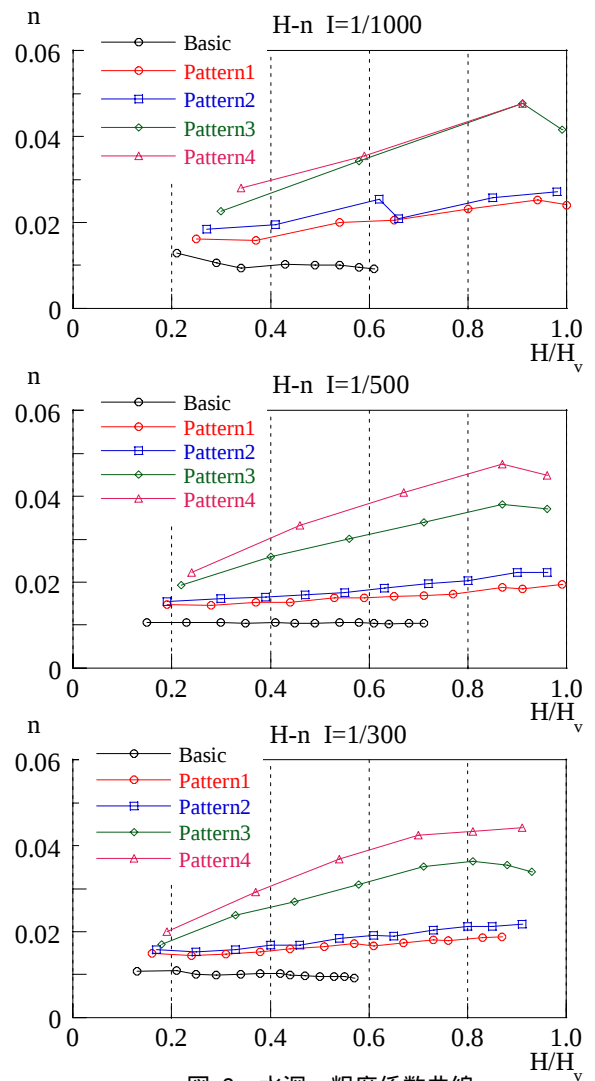


図-3 水深・粗度係数曲線

列に配置した Pattern4 はその約 2 倍の水深を示す． Pattern3,4 に関しては $I=1/1000$ では抵抗に違いがみられないものの、 $I=1/500$ 、 $I=1/300$ では Pattern4 が Pattern3 より抵抗が 10% 程度大きくなる．越流状態になると、流れ構造の変化に伴い直線の傾きも変化し、抵抗特性が若干変わることが読み取れる．

図-3 に非越流状態の下、植生の配置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．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．さらに、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、植生群落が主流部と接する境界面は潤辺と見なしておらず、植生群落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．何れのパターンも水深が底面付近から植生高さ付近まで増加するにつれて n 値も大きくなる傾向はあるが、Pattern1,2 では他のパターンに比べわずかしかな n 値が上昇していない．植生高さ付近において、 $I=1/500$ 、 $I=1/300$ では Pattern1,2 と比較して Pattern3 は約 2 倍、Pattern4 は約 2.5 倍の n 値をとる．これにより、今

回の実験条件においては、植生帯を横断する流れを両境界で許容するような植生の配置では、河岸や両岸に配置する場合に比べ 2 倍程度抵抗が大きくなることが明らかになった．

4. 流動機構

植生群落を有する開水路流れの抵抗則に影響を与える要因として水面変動や運動量輸送特性などが挙げられる．そこで、 $I=1/500$ で非越流状態にある $Q=5$ l/s の条件の下、Pattern1,2,3 について水面変動や平均流特性の検討と相対評価を行う．平均流特性については、大本らの研究⁵⁾により非越流状態では移流に比べ流速変動による運動量輸送が支配的であり、その傾向は鉛直方向に一樣であることが示されたため、本研究では水面流況で検討を行った．

(1) 水面変動特性

図-4 は Pattern1,2,3 における横断方向 3 点の水面変

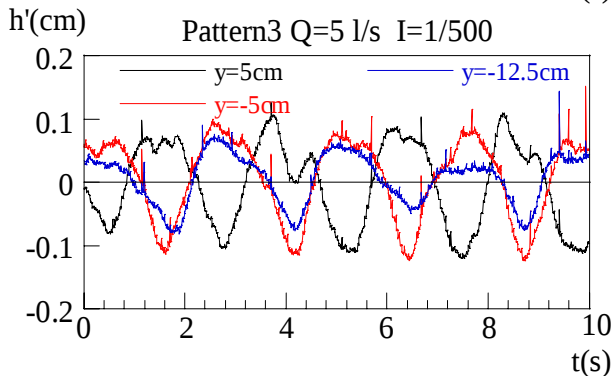
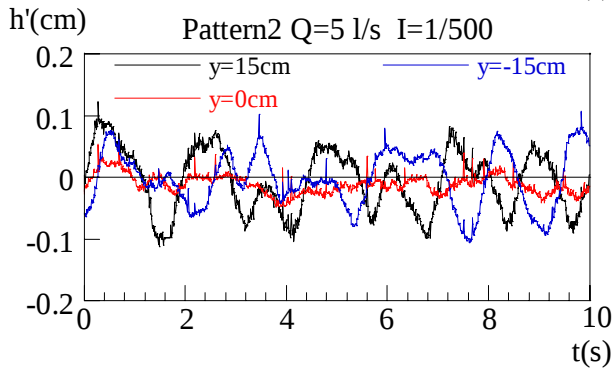
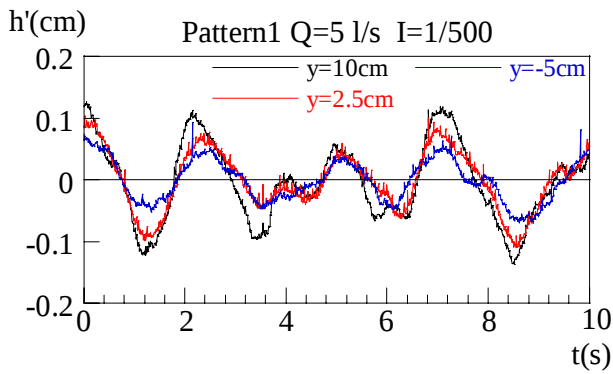


図-4 水面変動の時系列

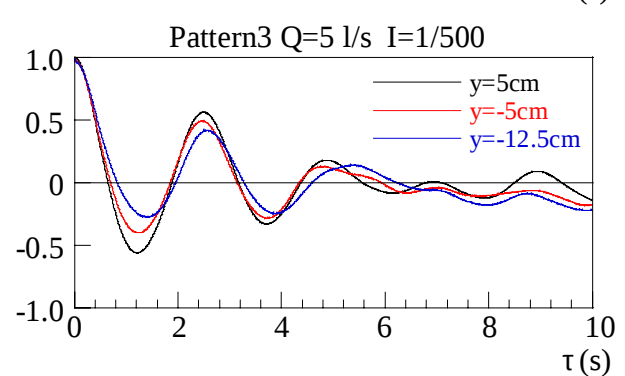
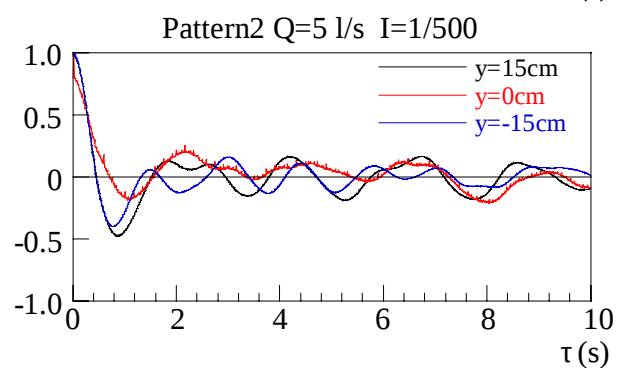
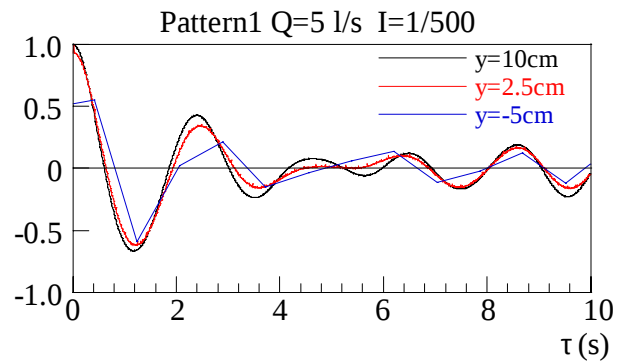


図-5 水面変動の自己相関係数

動の同時計測の時系列データである。各パターンにおける計測位置は図中に示すとおりである。Pattern1では3点とも同位相となったが、周期性が高いことが確認できる。Pattern2においては植生帯両境界では振幅は同程度であるが、植生帯中央では振幅が小さく周期の把握も困難である。Pattern3については大本ら⁶⁾の研究同様、植生帯両境界で逆位相をとり、高い周期性を有する。どのパターンにおいても振幅は最大約0.1cmとほぼ同程度の値をとる。

図-5は各パターン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。

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

Pattern1のy=10, 2.5cmではセカンドピークが2.4~2.5sとほぼ同一周期をとり相関性も高いが、植生帯から最も位置が離れたy=-5cmでは周期性、相関性とも低くなっていることが伺える。これはPattern1が横断方向に非対称性を有することも1つの要因として考えられる。Pattern2では各位置ともセカンドピークが異なり、水面

変動の周期を捉えるのは困難である。Pattern3ではセカンドピークが2.5sとほぼ同程度であり、高い周期性と相関性を有している。禰津ら⁷⁾によって水面変動が周期的な瞬間流速分布や2次流分布に大きな影響を与えることが指摘されているものの、今回の実験では流れの抵抗特性に大きな違いがあるPattern1,3において、Pattern1のy=-5cmを除きほぼ同様の振幅、周期をとる。このため次の節中で流速変動の相関性について検討を行う。

(2) 平均流特性

a) 平均流速の横断方向変化

図-6は主流速Uと横断方向流速Vの横断方向変化である。何れのパターンにおいても主流速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変化し、ほぼ主流部中央で最大値をとる。Pattern1では主流速の最大値が39.4cm/s、Pattern2では37.3cm/sとほぼ同様の値を示すが、Pattern3では両岸付近で極大値をとり、その値は18~19cm/sとPattern1,2の50%程度に抑えられている。横断方向流速Vは植生帯両境界で植

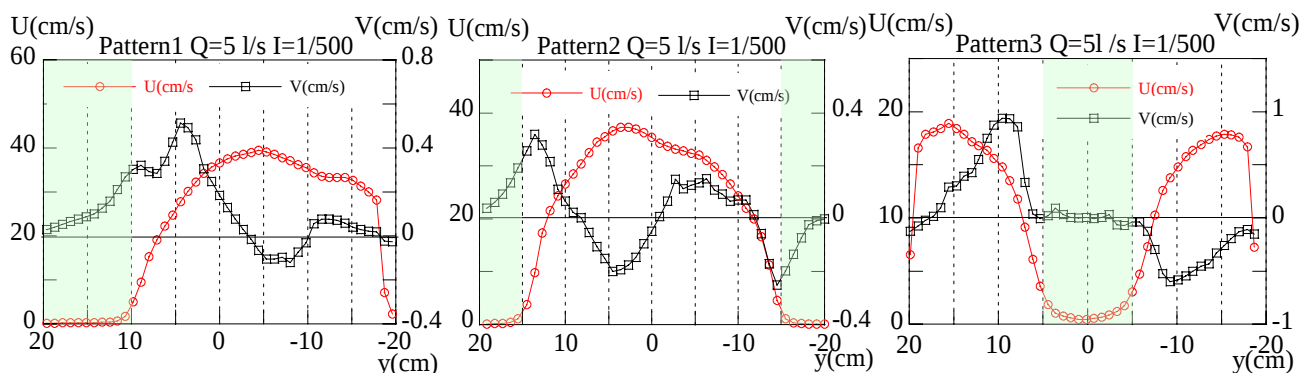


図-6 主流速 U と横断方向流速 V の横断方向変化

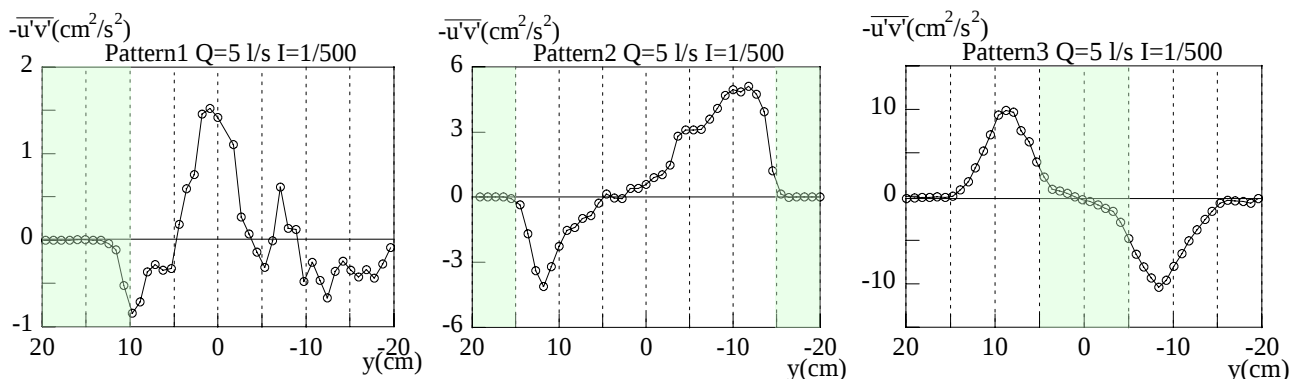


図-7 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断方向変化

植生域

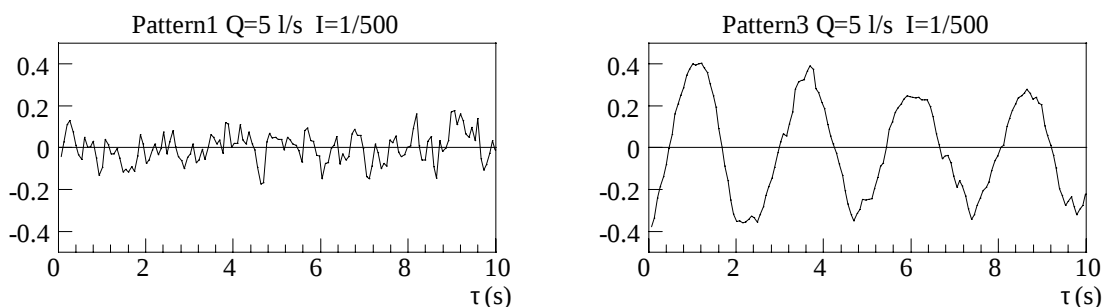


図-8 主流速の変動成分 u' と横断方向流速の変動成分 v' の相互相関係数

生帯を横断する流れを許容する Pattern3 で最も大きな値を取り、Pattern1,2 における最大値の約 2 倍となる。しかし、等流状態において横断方向流速 V は水深平均が 0 になるはずであり、横断方向流速 V は水面と内部では異なる値を取ることが予想され、二次流の存在が考えられる。水面下の情報についても今後詳細に検討しなければならない。

b) レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断方向変化

図-7 はレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断方向変化である。Pattern1 では植生帯境界と水路中央付近でレイノルズ応力の極値をとるが、これは主流速の横断分布の非対称性や二次流の影響が考えられ、今後検討すべき点である。Pattern2,3 では横断方向に対称性を有することからレイノルズ応力は水路中央を中心に点対称の分布をしており、植生帯両境界付近ではほぼ同様の極値をとる。レイノルズ応力の極値を平均して比較すると、Pattern1 では $1.2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ であり、Pattern2 は $4.6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ と Pattern1 の約

4 倍、Pattern3 では $10.1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ と Pattern1 の約 8 倍もの値を示し、植生帯内外の運動量輸送特性に大きな違いがあることが示唆された。

c) 主流速と横断方向流速の変動成分 u' 、 v' の相互相関

前節の水面変動特性において、Pattern1 の $y=10, 2.5 \text{ cm}$ と pattern3 の全計測点における水面変動が同様の周期と相関をもつことが示されたが、レイノルズ応力の極値は約 8.4 倍も異なる。そこで Pattern1,3 における主流速の変動成分 u' と横断方向流速の変動成分 v' の時系列データから相互相関係数を算出した値を図-8 に示す。Pattern1 では植生帯境界での時系列データが十分な精度を有していないことから、同様の傾向を持つレイノルズ応力が極大値を示す位置 $x=275 \text{ cm}, y=2 \text{ cm}$ のデータを用い、Pattern3 においても極大値を示す $x=275 \text{ cm}, y=8.74 \text{ cm}$ の位置データを用いた。相互相関係数は式(2)から求める。

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

表-2 単位長さ当りのせん断力

	Pattern1	Pattern2	Pattern3
単位長さ当りのせん断力 [g/(cm・s ²)・cm]	3.4	37.9	133.0

Pattern1 においては様々な周波数を含んでいるが、水面変動と同様な周期についても含んでいることがみてとれる。しかしその相関性は Pattern3 に比べ非常に小さく、このためにレイノルズ応力も小さくなることが示唆される。

(3) 植生帯境界における見かけのせん断力

図-6 より植生帯境界において主流速が顕著に減少していることから、マクロ的な視点からみると植生帯境界に見かけのせん断力が作用すると考えられる。そこで、Pattern1,2,3 の流れの抵抗特性について、平衡状態における流下方向の単位長さ当りに働くせん断力により検討を行う。見かけのせん断力 T を次の式(3)を用いて定量的に表現する。

$$T = \sum_{i=1}^n \tau_v \cdot H \quad (3)$$

ここに、 n : 非植生域と植生域の境界面の数、 τ_v : 境界せん断応力である。 τ_v に関しては図-7 のレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の植生帯境界における極値を用いる。式(3)により求めた単位長さ当りに働くせん断力 T を表-2 に示す。Pattern1 に比べ Pattern2 は約 11 倍、Pattern3 は約 39 倍もの値を示す。また、Pattern2 に比べ Pattern3 は 3.5 倍の値となった。

今回は鉛直方向にせん断応力が一様⁵⁾として式(3)を用いたが今後水面下についても詳細に議論しなければならない。しかし、せん断力の大小関係においては式(3)により評価できることが確認された。

5. おわりに

本研究では植生群落の配置の違いによる流れの抵抗特性について把握し、その抵抗則に影響を与えと考えられる流動機構の検討と各パターンでの相対評価を行った。平均流特性については、非越流状態では流速変動による運動量輸送が支配的であり、その傾向は鉛直方向に一様であることから、本研究では水面流況で検討を行った。しかし、水面下における流動機構についても今後十分に検討する必要がある。本研究により得られた知見を列挙する。

- 1) それぞれの植生帯配置パターンにおいて流量を 1 l/s 間隔で段階的に変化させ、各流量における水深を計測すると、水深は常に片岸配置、両岸配置、

中央 1 列配置、中央 2 列配置の順に大きくなることが明らかになった。非越流状態においては片岸配置と両岸配置はほぼ同様の水深をとるが、中央 1 列と中央 2 列配置ではその約 2 倍の水深をとる。また、越流状態になると、流れ構造の変化に伴い抵抗特性が若干変化することが示唆された。

- 2) 抵抗特性を粗度係数 n を用いて評価すると、植生高さ付近では片岸配置、両岸配置と比較して中央 1 列配置で約 2 倍、中央 2 列配置で約 2.5 倍の n 値をとる。これにより、今回の実験条件において、植生帯を横断する流れを両境界で許容するような植生の配置では、河岸や両岸に配置する場合に比べ 2 倍程度抵抗が大きくなることが明らかになった。
- 3) 水表面における主流速の最大値は片岸配置と両岸配置ではほぼ同様の値を示すが、中央 1 列配置では片岸配置と両岸配置の 50%程度に抑えられている。また、レイノルズ応力の極値は片岸配置に比べ両岸配置は約 4 倍、中央 1 列配置では約 8 倍もの値を示し、植生帯内外の運動量輸送特性に大きな違いがあることが示唆された。その中央 1 列配置は水面変動が周期的であり、主流速と横断方向流速の相関性が非常に高いことが確認された。
- 4) 流れの抵抗特性を平衡状態における流下方向の単位長さ当りに働くせん断力により表現すると、片岸配置に比べ両岸配置は約 11 倍、中央 1 列配置は約 39 倍もの値を示す。また、両岸配置に比べ中央 1 列配置は 3.5 倍の値となった。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法、森北出版株式会社、2005。
- 2) 中矢哲郎、池田駿介、戸田祐嗣：側岸部植生密度の変化が開水路横断方向運動量輸送に及ぼす影響、河川技術論文集、第 9 巻、pp.383-388、2003。
- 3) 福岡捷二、成田一郎、服部敦、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。
- 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。
- 6) 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。
- 7) 瀬津家久、鬼束幸樹、池谷和也：植生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 44 巻、pp.783-788、2000。

(2005.9.30 受付)