側岸凹部を有する種々の植生配置条件における 開水路流れの抵抗特性と乱流構造

INFLUENCE OF VEGETATION ARRANGEMENT PATTEN WITH SIDE CAVITY ON FLOW RESISTANCE AND TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL

田中貴幸¹・大本照憲²・古川和樹³

Takayuki TANAKA, Terunori OHMOTO and Kazuki FURUKAWA

¹正会員 博士(工学) 豊田工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

²正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番1号)

³豊橋技術科学大学 建築都市システム学課程

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. On the other hand, the cavity zone along riverside is expected to produce native habitats of various ecosystems and water-friendly environment. However, effects of side cavities on flow resistance and turbulent flow structures are ambiguous. In this paper, the influence that arrangement patterns of longitudinal discontinuous vegetation zones gave to the flow resistance in an open-channel was examined experimentally. 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 main flow region to vegetation and cavity zone.

Key Words : *vegetation, cavity flow, flow resistance, water surface oscillations, turbulent flow structure*

1. はじめに

愛知県犬山市を流れる郷瀬川, 新郷瀬川では, 多自然川づくりの一環として河道内に環境水制工を並列および千鳥状に配置することで, 多様な流れを創出する工法が採用されている。しかし, これらの工法や植生群落の配置に関しては, 流下方向に側岸凹部を連続的に有する植生開水路流れとなるため, 流れの抵抗特性に関して十分な議論がなされていない。

植生群落を有する流れの抵抗特性に関しては, Brian^{ら¹⁾}やJärvelä²⁾といった多くの研究者により, 植生の密度や配置を変化させた状態において研究がなされている。その中で, 植生群落の配置を変化させた研究として, 富永^{ら³⁾}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流れの抵抗と平均流速分布特性を実験的に明らかにした。瀬津^{ら⁴⁾}は有限幅における植生開水路流れの瞬間乱流構造について, 主に植生域と非植生域との相互作用に焦点を絞って, PIV法によって実験的に解析を行った。

また, 植生を有する開水路流れにおいて, 流下方向に非植生域である側岸凹部を有する条件に関する研究とし

て, 関根^{ら⁵⁾}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いて, 植生が流れに与える影響について解析し, さらに洗掘域と砂州域からなる特徴的な河床変動が現れることを明らかにした。著者^{ら⁶⁾}は流下方向に片岸にのみ不連続的植生群落を有する流れにおいて, 流れの抵抗特性を明らかにし, その抵抗を運動量輸送特性などにより説明を試みた。さらに, 植生群落といった透過性の側岸凹部を有する流れに加え不透過性についても検討し, 両者の違いおよび側岸凹部アスペクト比(凹部の流下方向長さ/凹部の横断方向長さ)の変化が流れの抵抗特性や運動量輸送特性に与える影響について明らかにした^{7,8)}。

このように, 流下方向に片岸にのみ不連続的植生群落を有する開水路流れに関しては検討がなされているものの, 新郷瀬川のように両岸に千鳥または並列状に配置されたような条件においては流れの抵抗特性の検討は十分になされていない。

そこで本研究では, 流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れにおいて, 千鳥状や並列状といった植生群落の配置の違いが流れの抵抗特性や流動機構に与える影響について検討する。

図-1 実験水路概要

表-1 実験条件（抵抗特性）

pattern	Flow discharge Q (ℓ/s)	Bed slope I	Vegetation height H_v (cm)	Vegetation length L_v (cm)	Vegetation diameter d (mm)	Cavity length L_c (cm)
P1	2 ~ 12	1/1,000	6.0	30	0.242	30
P2						
P3						

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 25cm の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 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 $H_v=6.0\text{cm}$ の高さに揃え、0.5cm 間隔で貼り付けたものを使用した⁹⁾。図-1 に開水路における植生帯の設置パターンを示す。1 つの植生帯幅は 5cm とし、植生帯の流下方向長さは $L_v=30\text{cm}$ に設定した。P1 は植生帯を両岸に並列に配置し、P2 は両岸に千鳥状に、P3 は片岸に 2 列配置した。いずれのパターンについても流下方向に側岸凹部を設けており、その流下方向長さを $L_c=30\text{cm}$ とした。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、流下方向に植生帯および遮断物と凹部を交互に水路上流端より 100cm~940cm の位置まで設置している。水深の計測にはポイントゲージを用い、水深の計測方法は著者らの既往の研究⁹⁾と同様とした。実験条件は表-1 のように設定した。

座標系は疑似等流場が主に形成された範囲を対象に、上流から 420cm における植生帯先端の水路中央底面を原点とし、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。

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、流下方向における計測位置は $x=0\text{cm} \sim 60\text{cm}$ の疑似等流場の範囲内とした。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 4,096 個のデータに関して統計処理を施した。電磁流速計における鉛直方向の計測位置は、大本⁹⁾の研究結果より、非越流状態においては越流状態に比べ二次元性が高いことが明らかとなっていることから、本論では半水深にて計測した結果を用いた。横断方向における計測位置は左岸側植生帯および凹部境界付近とし、本論ではこの計測位置において左岸側に植生帯を有する領域を植生域 (vegetation area)、凹部を有する領域を凹部域 (cavity area) と呼ぶことにする。

3. 抵抗特性

図-2 に各植生配置パターンにおける流量と水深の関係を示す。水深は植生高さにより無次元化を施している。図-3 は各植生配置における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 値に組み込まれている。

図-2 により、いずれの配置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様子が伺える。また、越流、非越流状態に関わらず、いずれの流量においても水深は千鳥配置である P2 が最も大きくなり、次に並列配置である P1、そして片岸配置である P3 が最も

図-2 流量と水深の関係

図-3 水深と粗度係数の関係

表-2 実験条件（流動機構）

pattern	Flow discharge Q (ℓ/s)	Bed slope I	Flow depth H (cm)	Mean flow velocity U_m (cm/s)	Froude number Fr	Friction velocity U_* (cm/s)
P1	4	1/1,000	5.06	19.8	0.28	2.23
P2			5.33	18.8	0.26	2.28
P3			4.91	20.4	0.29	2.19

小さくなる結果となった。流量 $Q=12\ell/s$ においては、千鳥配置であるP2は片岸配置であるP3に比べ約1.2倍の値を示すことが認められた。

図-3に注目すると、非越流状態においてはいずれの配置パターンにおいても粗度係数 n は水深が増加していくとともに減少していく様子が伺える。越流状態となった後、粗度係数はわずかに上昇傾向が見られるものの、P1およびP3では $H/H_v=1.4$ 付近、P2では $H/H_v=1.8$ 付近を境に粗度係数が減少する様子も確認できる。これらの傾向は、Wuら¹⁰⁾の洪水氾濫原における低木等を対象とした実験と同様の結果となった。

そこで本論では、まずは非越流状態における抵抗特性と流れ構造の関係を把握するため、流量 $Q=4\ell/s$ に注目し、流動機構について検討を行う。流動機構に関する実験条件を表-2に示す。ここで、摩擦速度は $U_*=\sqrt{gHI}$ より算出している。また、越流状態については今後検討していくこととする。

4. 流動機構

(1) 水面変動特性

図-4に各配置パターンにおける流下方向に同時計測を行った凹部内の水面変動時系列データを示す。計測位置は左岸側の凹部横断方向中央 $y/B=0.375$ において、流下方向に凹部上下流端から2cm離れた位置およびその中央位置の3点である。水面変動の振幅に注目すると、流れの抵抗が極大値を示したP2はP1に比べ特に凹部上下流において振幅が大きくなる様子が見てとれる。P2とP3はほぼ同程度の振幅を示している。P1に注目すると、凹部上下流の計測点にて逆位相を示しており、流下方向の振動が発生していることが示唆される。P2およびP3はP1に比べ周期の長い水面変動が発生している。P2は凹部上下流端の計測位置にて同位相や逆位相を繰り返し示すことが確認できたことから、流下方向以外の波が卓越して発生

していることが考えられる。P3においては凹部上下流端の計測位置にて水面変動は逆位相を示しており、流下方向の振動が卓越して発生していることが認められる。

図-5に各配置パターンにおける左岸側凹部中央($x/L=1.5$)にて横断方向に同時計測を行った水面変動の時系列を示す。計測位置はいずれも流下方向の左岸凹部中央において、P1とP3は両岸側壁から2cm離れた位置と水路中央であり、P2は左岸側側壁から2cm離れた位置、右岸側植生帯境界から2cm離れた位置、およびその中央となっている。

P1に注目すると、流下方向と同様に振幅はその他の配置パターンに比べ小さな値を示しており、左右側岸付近の計測位置において主に逆位相を示す様子が見て取れる。このため、P1においては流下方向および横断方向の振動が重なり合って発生していることが示唆される。P2については植生帯境界付近において植生帯の影響により水面変動の振幅がその他の配置パターンに比べ大きくなっており、規則的に変動している様子が伺える。左岸側側壁付近と水路中央付近の水面変動はほぼ同じ挙動を示しており、植生帯境界付近と同位相も逆位相も示していないことから、P2においては千鳥配置の影響により縦や横ではなく流下方向に斜めに振動が発生している可能性が考えられる。P3については植生帯が存在する左岸側の水路中央については振幅の大きい水面変動が発生しているものの、その他の計測位置においては水面変動が抑えられており、また、計測位置間において十分な規則性が見られないことから、主に流下方向の振動が卓越していることが伺える。

ここで、流下および横断方向に同時計測した水面変動の自己相関係数を図-6および図-7に示す。自己相関係数は式(1)で表される。

$$C_{h'h'}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h'(t)h'(t+\tau)dt \quad (1)$$

図-6の流下方向に同時計測した水面変動の自己相関係

図-4 流下方向に同時計測した水面変動の時系列 ($y/B=0.375$)

図-5 横断方向に同時計測した水面変動の時系列 ($x/L_v=1.5$)

図-6 流下方向に同時計測した水面変動の自己相関係数 ($y/B=0.375$)

図-7 横断方向に同時計測した水面変動の自己相関係数 ($x/L_v=1.5$)

数について、それぞれのセカンドピークに注目すると、P1は約2.4s、P2は約5.1s、P3は約3.8sとなっており、P1は周期が短い水面変動が発生し、P2は周期が最も長い水面変動が発生していることが認められる。また、P2は凹部中央では周期の異なる波が発生している様子が伺えるが、流下方向の植生帯と凹部境界付近では相関性が高く、規則的な振動が発生している様子が伺える。P3についても同様にP1に比べ相関性が高い振動が発生している。図-7の横断方向に同時計測した水面変動の自己相関係数に注目すると、P2では特に左岸側側壁付近および右岸側植生帯境界付近においてその他の配置パターンに比べ相関性

が高く、規則的な振動が発生している様子が伺える。P3では流下方向に植生帯を有する左岸側側壁付近と水路中央では規則的な振動が見られるものの、右岸側側壁付近では相関性が低い振動となっていることが認められる。P1においては左右両岸において規則的な水面変動の発生は見られるものの、その他の配置パターンに比べ周期が短く、相関性も低い様子が見て取れる。

これらにより、P2では水面変動が最も長周期で発生し、植生帯と凹部との境界、さらに凹部中央横断方向の左右両側岸付近において相関性および規則性が高い振動が発生している状態となっていることが、流れの抵抗を最も

図-8 主流速 U/U_m の流下方向分布

図-9 横断方向流速 V/U_m の流下方向分布

図-10 レイノルズ応力 $-u'v'/U_m^2$ の流下方向分布

図-11 移流による運動量輸送量 UV/U_*^2 の流下方向分布

図-12 流速変動による運動量輸送量 $u'v'/U_*^2$ の流下方向分布

図-13 全運動量輸送量 $(UV + u'v')/U_*^2$ の流下方向分布

大きくした要因の1つであると考えられる。

(2) 平均流特性

図-8に各配置パターンにおける左岸側植生帯および凹部と主流部との境界付近における主流速 U の流下方向分布を示す。P1およびP2は $y/B=0.225$ 、P3は $y/B=-0.025$ の位置にて計測を行っている。また、流速は断面平均流速 U_m で無次元化している。

いずれの植生配置においても、植生帯と凹部との流下方向の境界 $x/L_v=1.0$ 付近において流速が抑えられている様子が見てとれる。これは流下方向に凹部を有することで水路全体として流れが蛇行しているためだと考えられる。また、千鳥配置であるP2はその他のケースに比べ主流速が小さな値を示しており、流れの蛇行の影響が大きいことが示唆される。

そこで、図-9に示す各配置パターンにおける左岸側植生帯および凹部と主流部との境界付近における横断方向流速 V の流下方向分布について検討する。いずれの配置パターンにおいても植生域では植生帯から主流部に向かう流れが発生し、 $x/L_v=1.0$ を境に流れ方向が変化し、凹部域では主流部から凹部内に向かう流れが発生していることが認められる。その中でも千鳥配置であるP2はその他のケースと比べ横断方向流速が大きな値を示しており、流れが大きく蛇行している様子が伺える。

図-10に各配置パターンにおける流下方向のレイノル

ズ応力分布を示す。いずれの配置パターンにおいてもそのほとんどが負の値を示しており、乱れによる運動量は主に主流部から植生帯または凹部に運び込まれていることが示唆される。P2においてはその他の配置パターンよりも流れが大きく蛇行していることにより、流下方向に凹部域から植生域に移行する位置においてレイノルズ応力が正の値を示している⁸⁾。P3においてはその他の配置パターンに比べレイノルズ応力が大きな値を示しているものの、その他のパターンでは両岸に境界部を有するため、流れの抵抗が最も小さくなることが予測される。また、P1とP2について負の値に注目して比較すると、P2においてレイノルズ応力が大きな値を示すことから、P2の流れの抵抗も大きくなることが推測される。

(3) 運動量輸送特性

植生帯および凹部の影響により、主流部との境界において運動量および物質の交換が促進されることが予測される。ここで、横断方向の運動量輸送を次式で与える。

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

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。

図-11に各配置パターンにおける移流による運動量輸送量の流下方向分布を示す。運動量輸送量は摩擦速度 U_* を用い無次元化している。いずれの配置パターンに

においても植生域では移流による運動量は植生帯内から主流部へ運ばれており、凹部域では主流部から凹部内へ運び込まれている様子が伺える。このため、いずれの配置パターンにおいても流れが蛇行することで、流下方向に移流による運動量が規則的に交換されていることが認められる。正負の極大値について注目すると、流れの抵抗特性が最も大きくなった千鳥配置であるP2において比較的運動量交換量も大きな値を示している。

図-12に各配置パターンにおける流速変動による運動量輸送量の流下方向分布を示す。いずれの配置パターンにおいても、そのほとんどの計測位置にて流速変動による運動量は主流部から植生帯または凹部内へ運び込まれている様子が見てとれる。その中で、P3は流下方向に全体的にその他の配置に比べ運動量輸送量が大きな値を示している。これは、P3は片岸にのみ植生を配置した状態であるため、植生帯幅および凹部幅が大きくなり、その影響で主流部との流速差が大きくなったためだと考えられる。

図-13に各配置パターンにおける全運動量輸送量の流下方向分布を示す。いずれの配置パターンにおいても約 $x/L_v=0.6$ 以下では運動量は植生帯内から主流部に運ばれており、約 $x/L_v=0.6$ 以上においては主流部から植生帯または凹部内へ運動量が運び込まれていることが認められる。約 $x/L_v=0.6$ 以上においては、運動量輸送量はP3がその他の配置パターンに比べ大きくなっているが、その他の配置パターンは両岸に境界部を有することから、P3よりも流れの抵抗が大きくなったと考えられる。また、P2はほぼ全領域においてP1よりも運動量輸送量の極値が大きな値を示していることから、流れの抵抗も大きくなったと推測される。これにより、植生帯および凹部と主流部との境界付近における運動量輸送特性を把握することで、流れの抵抗特性をある程度説明できることが明らかとなった。また、本実験結果においては移流による運動量輸送量と流速変動による運動量輸送量のオーダーが同程度となったことから、三次元的な流動機構についても検討していく必要がある。

5. まとめ

本研究では、流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れにおいて、千鳥状や並列状といった植生群落の配置の違いが流れの抵抗特性や流動機構に与える影響について検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 流れの抵抗特性について検討した結果、越流、非越流状態に関わらず、いずれの流量においても水深は千鳥配置が最も大きくなり、次に並列配置、そして片岸配置が最も小さくなることが明らかになった。
- 2) 水面変動特性について見てみると、流れの抵抗が最も大きくなった千鳥配置においては、その他の配置パターンに比べ水面変動が最も長周期で発生し、流下方

向の植生帯と凹部との境界、さらに凹部中央横断方向の左右両側岸付近において相関性および規則性が高い振動が発生していることが認められた。

- 3) 平均流特性について見てみると、いずれの植生配置においても流下方向に連続的に側岸凹部を有する影響を受け流れが蛇行しており、その中でも千鳥配置において流れが最も大きく蛇行していることが認められた。そのため、並列配置に比べ千鳥配置に置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横断方向の乱れが強く発生する結果となった。
- 4) 運動量輸送特性に注目すると、千鳥配置では並列配置に比べ全運動量輸送量の極値が大きな値を示すとともに、極値が同程度となった片岸配置よりも植生帯および凹部と主流部との境界面が多いことから、流れの抵抗特性が最も大きくなったと考えられる。これにより、植生帯および凹部と主流部との境界付近における運動量輸送特性を把握することで、流れの抵抗特性をある程度説明できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Brian, M. S., Shen, H. T.: Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No.5, pp.500-506, 2002.
- 2) Järvelä, J.: Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance, *Journal of Hydrology* 307, pp.233-241, 2005.
- 3) 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.
- 4) 禰津家久, 鬼束幸樹, 定免英樹, 相良幸輝, 池谷和哉: PIVを用いた植生開水路流れの組織渦構造解析, *応用力学論文集*, Vol. 1, pp.719-728, 1998.
- 5) 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.
- 6) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 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, *水工学論文集*, 第52巻, pp.763-768, 2008.
- 7) 田中貴幸, 大本照憲: 透過性および不透過性の側岸凹部流れにおける抵抗特性と流動機構, *土木学会論文集B1 (水工学)*, Vol. 68, No.4, pp.I-805-I-810, 2012.
- 8) 田中貴幸, 大本照憲: 凹部アスペクト比の違いが透過性および不透過性の側岸凹部流れに与える影響, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol. 69, No. 2, I-471-I-478, 2013.
- 9) 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.
- 10) Wu, F.-C., Shen, H. W., Chou, Y.-J.: Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering* 125 (9), pp.934-942, 1999.