平坦河床から植生群落に遷移する過程で発生する Diverging Flowに関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DIVERGING FLOW AT THE BOUNDARY BETWEEN FLAT BED ZONE AND VEGETATION PATCH ZONE

岡本隆明¹, 前川卓耶², 山上路生³

Takaaki Okamoto, Takuya Maegawa and Michio Sanjou

¹正会員, 工博, 京都大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂キャンパス)

²学生員, 京都大学大学院修士課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員, 工博, 京都大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

In many natural rivers, aquatic vegetation occurs in patches of finite length. In such vegetated flows, the shear layer has not formed at the upstream edge of the vegetation patch and coherent motions develop downstream. The longitudinal advection of these coherent vortices contributes significantly to mass and momentum transport.

However, there is almost no detailed information about the developing process of large-scale coherent structure within the vegetation patch. So, in this study, we consider the effect of the limited length vegetation patch. Flow images were taken by CCD and the instantaneous velocity vectors were analyzed by PIV techniques. The results showed that (i) the 3-D diverging flow occurs at the vegetation patch edge and (ii) as the coherent structures develop downstream in nonwake zone, the rate of the vertical momentum transport by Sweep motions becomes larger.

Key Words : *vegetation flow, diverging flow, wake zone, 3-D flow structure, PIV*

1. はじめに

実河川では植生群落は流下方向に不連続で部分的に散在するケース(Patch)が多くみられる。このような植生群落の上流端では群落の外側への流体の流れ込み現象(Diverging flow)が発生する。実河川ではこのDiverging flowによって河床変動が促進されることが知られている。すなわち, Diverging flowによって主流側に流れが集中し河床が洗掘される。一方で植生群落には流れの抵抗を増加させるという効果があるため, 河道内植生の伐採など植生管理していく上で流下方向に不連続な植生Patch群落流れの水利特性を詳細に検討することが必要である。

Folkard(2005)¹⁾は最初に流下方向に不連続な植生群落を対象とした実験を行い, 植生群落背後でレイノルズ応力が増加するという結果を得た。大本ら(2006)²⁾は植生群落の配置を系統変化させて水路実験を行い, 流れ抵抗特性・表面流況の変化を解明した。Sukhodolov & Sukhdolova (2006)³⁾は実河川植生群落の乱流構造の流下方向変化について調べ, かぶ

り水深が小さいケースでは自由水面によって混合層の流下方向の発達を抑えられることを解明した。

Fonseca & Koehl (2006)⁴⁾は植生群落の幅が大きくなると植生層内部でのレイノルズ応力が増加することを示した。Boumaら (2007)⁵⁾は実河川で植生群落周辺の流れ場の現地計測を行い, 植生群落の上流側では河床が洗掘され下流側では土砂が堆積するという結果を得ている。Zong & Nepf (2011)⁶⁾は植生群落の上流端では流れ場が急変し植生外部への流れ込み現象(Diverging Flow)が起こることを明らかにした。Siniscalchi et al. (2012)⁷⁾は植生群落を有する流れ場で植生にかかる抗力を計測し, 群落の上流端では植生抗力が大きくなることを示した。

このように植生開水路流れの研究は国内外で数多く行われているが, 植生のない平坦河床から植生群落へ遷移する過程を研究した例が少なく, 未解明な点が多い。また流れの急変部で発生する植生群落の外側への流体の流れ込み現象(Diverging Flow)は非常に複雑な3次元構造を有するため, 十分な実験データが得られていない。そこで本研究では横断方

表-1 実験条件

	Φ	$U_m(\text{cm/s})$	$H(\text{cm})$	$h(\text{cm})$	H/h	Re	Fr	計測位置
Case1	0.061	12.0	15.0	5.0	3.0	18000	0.10	Nonwake zone
Case2								Wake zone

図-1 実験装置図（水平面PIV）

図-2 LLSの横断方向照射位置(縦断面PIV)

向に計測位置を変化させてNonwakeとWake領域の縦断面PIV計測を行い、鉛直方向の流体の流れ込み現象について考察する。さらに、水平面PIV計測を行い横断方向の流れ込みを考慮したDiverging Flowの3次元構造を解明する。

2. 実験装置と計測方法

図-1に実験装置図を示す。実験に用いた水路は全長10m, 幅40cm, 高さ50cmの可変勾配型水路であり、詳細は前報⁸⁾を参照願いたい。等流状態になるように水路勾配を変化させている。 x, y および z は、それぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向である。 U, V および W は各方向における時間平均流速、 u, v および w はそれぞれ瞬間流速 $\tilde{u}, \tilde{v}$ および $\tilde{w}$ の乱れ変動成分を示す。 H は全水深、 h は植生高さである。鉛直方向の原点($y=0$)は水路底面、流下方向の原点($x=0$)は植生群落上流端の植生要素の位置とした。水路底面には、計測部を含めて5mの区間にわたって図-2で示すように植生モデルを正方格子状に配置した。本研究の植生モデルは高さ50mm, 幅8mm, 厚さ1mmの亚克力板で作成した剛体植生⁸⁾で、水流によって形状は変化しない。 B_v, L_v はそれぞれ横断方向、流下方向の植生配置間隔で $B_v = L_v = 32\text{mm}$ とした。また植生要素の背後のwakeの影響が大きく、流速が遅い領域をwake zone, 植生要素間の流速が速い領域をNonwake zoneとする。

流速計測にはPIV法を用いた。図-1に水平面のPIV計測システムを示す。3WのAr-ionレーザーを光源として水路側方から厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を照射し、水路上方に設置した高速度CCDカメラ(1024×1024 pixel)でデジタル撮影した。計

測位置は植生外部と内部を含むように $y/h=0.9, 1.0, 1.2$ とした。縦断面のPIV計測ではLLSを水路上方から照射し、照射位置は図-2のように植生背後領域(Wake zone)と植生間領域(Nonwake zone)とした。トレーサーには粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.02のポリスチレン粒子を用いた。カメラに30Hzの外部トリガーを与えて、500Hzのフレームレートで2枚の連続画像のペアを60秒間計測した。撮影領域のサイズは $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 領域である。本研究では平坦河床から植生領域まで($x=-50\sim 400\text{cm}$)を含むように高速カメラの位置 x_m を流下方向に変化させており、計測位置の間隔 m は $m=10\text{cm}$ である。

表-1は水理条件を示す。植生密度 Φ 、断面平均流速 U_m 、全水深 H は全ケースで一定とした。本研究の植生密度は Φ ($\Phi=ab$: a は単位体積あたりの植生の遮蔽面積⁸⁾, b は植生モデルの横幅)で算出している。本研究では植生群落上流端で発生する横断方向の流体の流れ込み現象(Diverging Flow)を解明するために横断方向に計測位置を変化させてNonwakeとWake zoneを計測した。

3. 実験結果と考察

(1) 植生域上流端での鉛直方向のDiverging Flow

平坦河床から植生流れに遷移する過程で、特に植生群落上流端で流れ場が急変し、平均流特性も大きく変化すると考えられる。本節ではDiverging Flowの発生に伴う流速分布の遷移過程について詳細に考察するために、図-3(a), (b)に平坦河床から植生群落領域まで($-1.0 \leq x/h \leq 10.0$)のNonwakeとWake zoneの時間平均流速鉛直分布 $U(y)$ の変化を比較した。図-3(b)のWake zoneでは上流端の植生要素によ

図-3 植生群落上流端での主流速分布
(a) Nonwake zone, (b) Wake zone

図-5 植生群落上流端での鉛直流速コンター
(a) Nonwake zone, (b) Wake zone
 $V(h)$ (m/s)

図-4 代表高さ主流速の流下方向変化

図-6 植生先端部鉛直流速の流下方向変化
(Nonwake zone)

って流速分布が急激に低減し、植生内部で逆流域 ($U < 0$) がみられる。 $x/h \geq 4.0$ ではWake zoneの植生内部の流速分布はほとんど変化しない。これに対して、Nonwake zoneでは植生群落に入った直後 ($x/h=0.2$) に植生内部で流速値が増加しており、これについては図-4で詳述する。下流側では ($x/h \geq 1.0$) 植生内部の流速分布が低減し、 $x/h \geq 4.0$ では植生先端部に変曲点をもつ混合層型流速分布となっている。

NonwakeとWake zoneの植生抗力による減速効果の違いを直接比較するために、図-4に植生内部と植生外部の代表高さ ($y/h=0.4, 2.0$) における平均流速値 U の流下方向変化を比較した。平坦河床部 ($x/h \leq -2.0$) ではNonwakeとWake zoneの流速差はみられない。植生群落上流端 ($x/h=0.0$) においてWake zoneでは植生内部の流速値が減少するのに対し、Nonwake zoneでは流速値が急激に増加しており、注

目される。これはWake zoneで植生群落の上流側から流れてきた流体が植生要素を横断方向に避けてNonwake zoneに流れ込んだためだと考えられる(横断方向のDiverging flow)。 $x/h \geq 4.0$ ではWake zoneの流速値はほとんど変化しないため、Wake zoneからNonwake zoneへの流れ込みはみられない。Nonwake zoneでは $0.0 \leq x/h \leq 12.0$ で植生内部の流速が減少し、 $x/h \geq 12.0$ で流速値が安定している。植生外部ではWake zoneとNonwake zoneの両方において $0.0 \leq x/h \leq 12.0$ で流下方向に流速値が増加しており、これは植生内部で流速が減速し植生外部に流体が流れ込む(鉛直上向きのDiverging Flow)ためだと考えられる。

図-5(a), (b)はNonwakeとWake zoneの差が大きいと考えられる植生群落の上流端付近 ($-1.0 \leq x/h \leq 1.0$) の時間平均流速 (U, V) のベクトル分布

図-7 時間平均流速コンターと流速ベクトル (a)主流速, (b)横断流速

図-8 レイノルズ応力ピーク値流下方向変化

を示す。カラーコンターは時間平均鉛直流速 V である。Wake zoneにおいて植生先端部でNonwake zoneより強い上昇流がみられる。すなわち、Wake zoneにおいて強い鉛直上向きのDiverging Flowが発生するため、Nonwake zoneに比べ植生外部で流速値が大きくなっている。この傾向は図-4にもみられ、 $-1.0 \leq x/h \leq 1.0$ でWake zoneの流速値がNonwake zoneより大きい。また植生群落の上流端($x/h=0.0$)では底面付近で下降流が発生しているのが観察される。これはBoumaら(2007)⁵⁾の現地計測結果と一致しており、この下降流によって植生群落上流端で洗掘が起これと考えられる。また図-5(b)では植生模型間で上昇流、植生外部で下降流が発生するため二次流が発生していると考えられる。今後ステレオ計測を導入するなどして詳細に検討したい。

図-3で考察した鉛直方向のDiverging Flowについてさらに詳細に考察するために、図-6にNonwake zoneにおける植生先端高さの時間平均鉛直流速 $V(h)$ の流下方向変化を示す。植生群落の上流側から植生群落上流側にかけて鉛直流速 $V(h)$ が増加し、鉛直上向きのDiverging Flowが発生している。これに対して、群落内では $V(h)$ が流下方向に減少しているのが観察される。これはSukhodolov & Sukhdolova (2006)³⁾の結果と一致している。鉛直流速 $V(h)$ は $x/h \geq 12.0$ で

ほぼ0になるため、鉛直上向きのDiverging Flowは $x/h=12.0$ で終了すると考えられる。

(2) 植生域上流端での横断方向のDiverging Flow

次に図-4で考察した横断方向のDiverging Flowについて考察する。図-7(a)にWake zoneからNonwake zoneへの流れ込みが大きいと考えられる植生内部($y/h=4.5$)の時間平均主流速 U の水平面コンターを示す。ベクトルは時間平均ベクトル(U, W)を示す。植生群落の上流端($x/h=0.0$)においてNonwake zoneへの流れ込み(Diverging Flow)が発生し、主流速 U の値がNonwake zoneで増加している。これに対して、Wake zoneでは植生抗力の影響で主流速 U の値が減少している。下流側では、Wake zoneとNonwake zoneの流速値の差は小さくなっているのが観察される。

図-7(b)に植生内部($y/h=4.5$)の時間平均横断流速 W の水平面コンターを示す。植生群落の上流端($x/h=0.0$)において植生要素周辺で横断流速 W の正負コンターが大きくなっているのがみられるが、流下方向に進むにつれて植生要素周辺の横断流速 W の値が小さくなっている。これより横断方向のDiverging Flowは植生群落の上流端($x/h=0.0$)でのみ発生し、植生群落の内部($x/h>0.0$)では鉛直上向きのDiverging Flowが卓越することがわかった。

(3) Diverging Flowの発生と乱流構造の変化

前節で植生群落上流端ではNonwake zoneからWake zoneへの流体の流れ込み現象が発生し、流れ構造が急激に変化する領域(Diverging Flow region)が存在することがわかった。本節ではこのDiverging Flow regionでの乱流構造の変化について考察する。

図-8にはNonwakeとWake zoneのレイノルズ応力の

図-9 条件付サンプリングレイノルズ応力 Sweep と Ejection の寄与率の差

ピーク値の流下方向変化を比較した。値は断面平均流速 U_m で無次元化している。Nonwake zone では植生群落上流端付近(Diverging Flow region) で $-\overline{uv}$ のピークは小さいが、 $x/h \geq 12.0$ から流下方向に流れが発達するにつれて $-\overline{uv}$ のピークが増加している(Developing region)。これに対して、Wake zone では Nonwake zone より Diverging flow において $-\overline{uv}$ のピーク値が大きい。これは図-3, 4 で考察したように Wake zone では植生内部で流速が大きく低減し、流速分布のせん断が大きくなっているためである。Developing zone では組織渦が発達し $-\overline{uv}$ のピーク値は Wake zone と Nonwake zone で同程度となっている。

平坦河床から植生流れへの急変部での運動量輸送メカニズムについて詳細に調べるために、次式で定義されるレイノルズ応力の4象限区分解析を行った。

$$RS_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)v(t)I_i(t)dt \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

(u, v) が i 象限に存在するとき、 $I_i(t)$ は1、それ以外は0とする判別関数である。図-9にNonwakeとWake zone における Ejection と Sweep の寄与の差 $\Delta RS = RS_4 - RS_2$ の流下方向変化のコンター図を示す。図中にはレイノルズ応力分布から判定した混合層の上端と下端高さを併示した。図から Nonwake zone では $x/h \leq 12.0$ では RS_4 (Sweep: $u>0, v<0$) と RS_2 (Ejection: $u<0, v>0$) に差はみられない。平均主流速分布が十分に発達した $x/h \geq 12.0$ では植生外部で ΔRS が負になり Ejection が卓越し、植生内部で ΔRS が正値をとり Sweep が卓越している。これらの組織乱流が卓越する領域は混合層領域に対応しており、注目される。また $x/h = 20.0$ で運動量が植生高さの半分 ($\delta_e/h = 0.5$) にまで浸透している⁹⁾。これに対して、Wake zone では Nonwake zone より短い距離で植生先端部で ΔRS が大きな正値をとり Sweep が

図-10 組織渦の発達に伴う横断方向スケールの変化

Ejection より卓越するが、 $x/h = 20.0$ で運動量が植生高さの20% ($\delta_e/h = 0.2$) 程度しか浸透しない。これは Wake zone では植生要素によって植生内部への運動量輸送が遮蔽されるためである。これらの結果から Sweep は Nonwake zone で発達して、植生内部と外部の運動量交換が活発になることがわかった。

(4) 大規模組織渦の3次元構造の変化

植生流れが発達するにつれて組織渦の空間スケールや3次元構造も大きく変化すると考えられる。植生流れが発達すると流下方向の渦スケールが増加することは既往研究¹⁰⁾によって示されているが、渦の横断方向スケールを評価したものはみられない。本研究では水平面PIV計測によって得られた多点データから組織渦の横断スケールを直接評価する。ここで時空間相関係数 C_{ww} は次式で定義される。

$$C_{ww} = \frac{w(x_0, z_0, t_0)w(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0)}{w'(x_0, z_0)w'(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z)} \quad (2)$$

ここで (x_0, z_0, t_0) は固定点の座標で、 $(x_0 + \Delta x, z_0 + \Delta z, t_0)$ は移動点の座標である。図-10に $x/h=0, 10$ (Diverging flow region), $x/h=20, 40$ (Developing region) の時空間相関 C_{ww} の横断分布を示す。相関基準点は植生層外部の点 ($y/h = 1.2$) で nonwake region の中心とした。基準点を中心とした相関分布 C_{ww} の広がり下流にいくほど大きくなっている。これより渦の横断方向スケールも増加し組織渦の3次元構造が成長し変化することが示された。Ghisalberti & Nepf (2005)¹¹⁾ は染料を用いた可視化実験から組織構造の横断スケールはかぶり水深や植生密度によって変化することを提案しており、今後さらに詳細な検討が必要である。

(5) 平坦河床から植生群落に遷移する現象モデル

最後にこれまでの解析結果をもとに作成した平坦河床から植生流れに遷移する現象モデルを図-11に示す。植生群落の上流端では Wake zone の流体が植生要素を横断方向に避けて Nonwake zone に流れ

図-11 平坦河床から植生群落に遷移する現象モデル

込むDiverging Flow現象が発生する．また流体の一部は植生を鉛直上向きに避けて植生層外部に流れ込む．このDiverging Flow現象は $x/h \geq 12.0$ でみられなくなり，Nonwake zoneで組織渦が生成され植生内部でのSweepの寄与が大きくなる．組織渦が流下方向に発達するにつれて，流下方向の渦スケールは増加する．組織渦スケールは横断方向にも成長し， $x/h=40.0$ で渦スケールの成長が安定する．このような組織渦の発生領域と横断方向の渦スケールの関係性については今後詳細に検討したい．

4. 結論

本研究では平坦河床から植生流れに遷移する流れ場を対象に水平面と縦断面のPIV計測を行うことで，流れの急変部で発生するDiverging Flowの3次元構造について考察した．以下に得られた知見をまとめて示す．

- 1) 平坦河床から植生流れに遷移する過程で2種類のDiverging Flowが発生することがわかった．植生群落の上流端ではWake zoneの流体が植生要素を横断方向に避けてNonwake zoneに流れ込む横断方向のDiverging Flowが発生し，Nonwake zoneで流速が増加することがわかった．これにより植生群落の上流端では洗掘が発生すると推測される．これに対し，十分に下流の植生群落内では流速値が低減しているため，土砂堆積が起こると考えられる．
- 2) 鉛直流速のコンターから流体の一部は植生を鉛直上向きに避けて植生層外部に流れ込む鉛直方向のDiverging Flowが発生する．この鉛直方向のDiverging Flow現象は $x/h = 12.0$ でみられなくなった．
- 3) Diverging Flow現象が終了した後に，レイノルズ

応力のピーク値が急激に増加し，Nonwake zoneにおいて植生内部のSweepの寄与が大きくなることがわかった．

- 4) 水平面のPIV計測結果から組織渦の横断方向スケールを評価した．相関係数の横断方向の広がりが流れの発達に応じて大きくなることから，組織渦は3次的に成長し変化することが示された．

本研究は(財)河川整備基金による研究助成の下で遂行された．ここに謝意を表する．

参考文献

- 1) Folkard, A.M. (2005): Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patches in shallow water, *Limnol. Oceanogr.* Vol.50(5), pp.1592-1600
- 2) 大本照憲・田中貴幸・矢北孝一(2006)：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．
- 3) Sukhodolov, A. and Sukhodolova, T. (2006): Evolution of mixing layers in turbulent flow over submerged vegetation: Field experiments and measurement study, *Proc. of River Flow 2006, Lisbon*, pp.525-534.
- 4) Fonseca, M.S. and Koehl, M.A.R.(2006): Flow in seagrass canopies: The influence of patch width, *Estuarine Coastal Shelf Science*, Vol.67, pp.1-9.
- 5) Bouma, T.J., van Duren, L.A., Temmerman, S., Claverie, T., Blanco-Garcia, A., Ysebaert, T. and Herman, P.M.J. (2007): Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures, *Continental Shelf Research*, Vol.27, pp.1020-1045.
- 6) Zong, L. and Nepf, H. (2011): Spatial distribution of deposition within a patch of vegetation, *Water Resource Research*, Vol.47, pp.1020-1045.
- 7) Siniscalchi, F., Nikora, V. and Aberle, J. (2012): Plant patch hydrodynamics in streams: Mean flow, turbulence and drag force, *Water Resour. Res.*, Vol.48, W01513
- 8) 岡本隆明・禰津家久・山上路生(2009)：柔軟性を有する植生開水路流れの組織乱流構造と藻波現象に関する実験的研究，土木学会論文集B，Vo.65, No.3, pp.190-202.
- 9) Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. (2000): Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow, *J. of Geophysical Res.*, Vol.105, pp.28547-28557.
- 10) 片山愛来・岡本隆明・禰津家久・辻井翔太・前川卓耶 (2011)：植生流れの大規模組織渦構造の発達メカニズムに関する研究，水工学論文集，土木学会，Vol.55, pp. 1033-1038.
- 11) Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2005) : Mass Transport in Vegetated Shear Flows, *Environmental Fluid Mechanics.*, Vol. 5, pp.527-551.

(2012.9.30受付)