

〔特集〕潤滑・摩擦・抵抗 —マイクロとマクロにまたがる流体研究—

# 柔軟性を有する植生流れの抵抗則と乱流構造

京都大学 工学研究科

岡本 隆 明\*

## Flow Resistance law and Turbulence Structure in Flexible Vegetation Flow

\* Takaaki OKAMOTO, Graduate School of Engineering, Kyoto University

\*E-mail: takaaki.okamoto@water.kuciv.kyoto-u.ac.jp

### 1 はじめに

実河川に繁茂する植生群落には(1)植生による周辺の流れの軽減, (2)植生に覆われた部分の侵食軽減などの効果が期待され, 多自然型河川工法に植生が用いられている. 一方で, 植生には(3)流れの抵抗を増加させるという効果があり, どの程度許容できるのかを解明することは河川管理上重要である<sup>1)</sup>. 特に植生が柔軟性を有する場合は, 植生が水流によって変形することで抵抗則が変化し流れ場が非常に複雑になる. そのため柔軟植生流れの抵抗則(時間平均流)に関する研究は国内外で数多く行われている<sup>2,9)</sup>.

一方で, 植生の変形・揺動を伴う流れ場は植生と流れの相互作用<sup>10,11)</sup>によって決定されるが, 柔軟植生流れの詳細な乱流構造や組織渦構造については既往研究で盛んに行われた時間平均流に比べると解明が進んでいないのが現状である. このため河川工学分野だけではなく, 気象学分野の大気植生<sup>12)</sup>や機械工学分野の乱流研究の知見を取り入れて, 流れと植生揺動の相互作用<sup>13)</sup>, 組織的揺動(Monami)の発生メカニズム<sup>14,16)</sup>, 組織渦の3次元構造<sup>17)</sup>を解明していくことが求められている.

本稿では柔軟植生の変形・揺動が流れ場に与える影響に焦点を当てた解説を試みる. 2章では柔軟植生流れの抵抗則と変形効果について紹介する. 3章では柔軟植生流れの乱流構造と揺動効果を紹介すると共に, 近年の柔軟植生研究の紹介を行う.

### 2 柔軟植生流れの抵抗則

#### 2.1 柔軟植生の揺動状態区分

柔軟植生流れでは流速や剛性によって揺動状態が変化することが知られている. 柔軟植生の揺動状態はその特性から次の4つの状態に区分して考えることができる

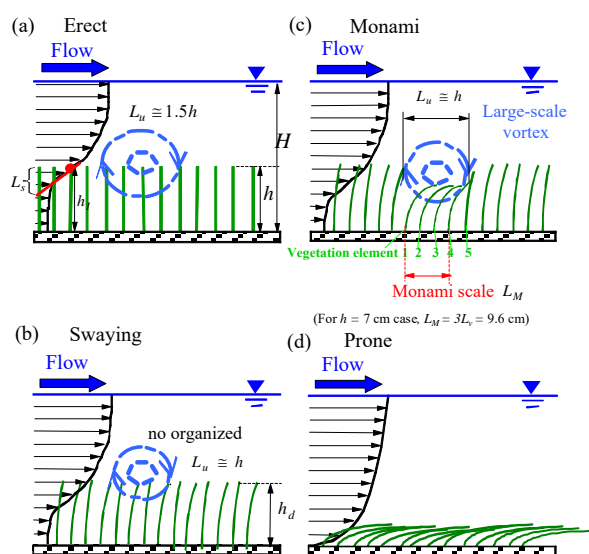


図1 柔軟植生流れの模式図

2,7).

- (a) *Erect*: 植生が直立している状態
- (b) *Swaying*: 植生が個々に揺動している状態
- (c) *Monami*: 植生のたわみが大きくなり, 組織的に揺動している状態
- (d) *Prone*: 植生が倒伏している状態

図1に柔軟植生の揺動状態の模式図を示す.  $h_d$ は柔軟植生の折れ曲がり高さである. *Erect*状態は平均流速が小さいときに観察され, 剛体植生とよく似た特性を示す.

流速が大きくなると, *Swaying*や*Monami*状態になるが, これらは植生のパラメータによって変化する. 特に*Monami*は植生密度の大きな場合にのみ発生するとされている.

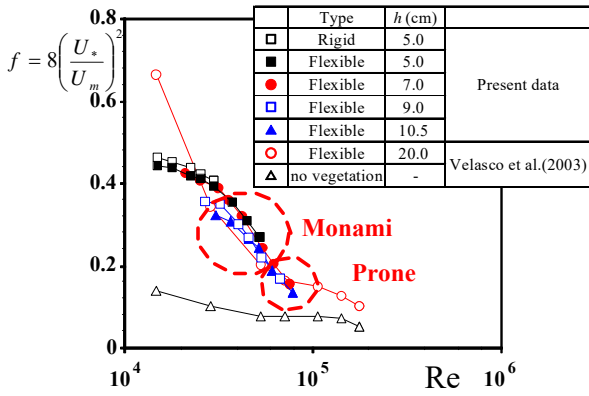


図2 柔軟植生流れの摩擦抵抗係数

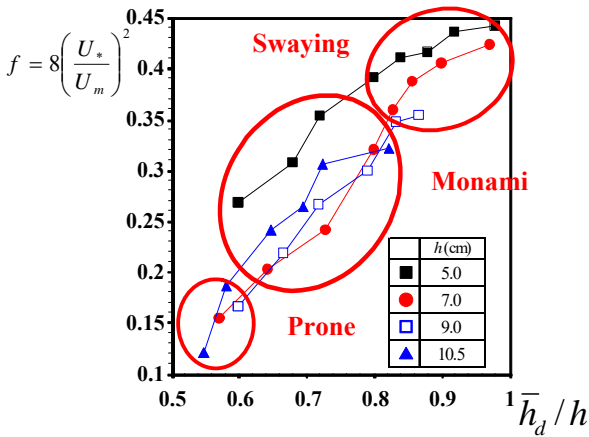


図3 柔軟植生変形による抵抗係数の変化

植生の剛性が小さいまたは流速が大きいときに植生は Prone 状態になる。剛性の大きな植生では平均流速が大きなケースでないと Prone 状態にはならない。Kouwen & Unny<sup>2)</sup>は摩擦速度  $U_*$ が限界摩擦速度  $U_{*c}$ を超えたケースでは植生が倒伏状態になるとした。Kouwen & Unny<sup>2)</sup>は水路実験結果から限界摩擦速度  $U_{*c}$ を計算し、以下の経験式を得ている。

$$U_{*c} = 0.028 + 6.33mEI^2 \quad (1)$$

$EI$ は植生の剛性、 $m$ は単位面積あたりの植生の本数で次式から算出される。

$$a = mb \quad (2)$$

$$a = \frac{\text{total frontal area}}{\text{volume of vegetation layer}} = \frac{A}{Vo} = \frac{n\bar{h}_d b}{h_d \cdot A_b} \quad [1/m] \quad (3)$$

$A_b$ は植生領域の底面積、 $n$ は面積上の領域に存在する植生素の本数、 $A$ は植生の遮蔽面積の合計。

## 2.2 柔軟植生流れの抵抗係数

柔軟植生の変形が流れ場の抵抗係数にどのような影

響を与えているのかについて述べる。図2には摩擦抵抗係数  $f = 8(U_*/U_m)^2$  とレイノルズ数  $Re$  の関係を示した。比較のため図中には Velasco ら<sup>9)</sup>の柔軟植生のデータを併示している。摩擦速度はレイノルズ応力のピーク値を用いて次式から算出した。

$$(-\overline{uv})_{peak} = U_*^2 \quad (4)$$

全体の傾向として  $Re$  の増加に伴い、摩擦抵抗係数  $f$  が減少する右下がりの傾向がみられる。本実験データは Velasco ら<sup>9)</sup>と同オーダーである。レイノルズ数の小さなケースで剛体植生と柔軟植生の抵抗係数  $f$  の値の差があまりみられないのは、流速が小さく柔軟植生が折れ曲がらないためである。これに対してレイノルズ数が増加すると、剛体植生と柔軟植生の差が大きくなり、また植生長さ  $h$  が増加すると  $f$  が減少する傾向がみられる。特に Prone ケースでは抵抗係数  $f$  が小さく、滑面の値と同程度である。

図3には摩擦抵抗係数  $f = 8(U_*/U_m)^2$  を柔軟植生 ( $h = 5.0, 7.0, 9.0, 10.5$ (cm)) のたわみ高さ  $\bar{h}_d/h$  についてプロットした。抵抗係数は植生のたわみ高さが増加すると大きくなる傾向がみられる (Jarvela<sup>5)</sup>。

これに対して、植生が倒伏した Prone 状態では抵抗係数が小さく、境界層に似た特性を示すとしているが、十分なデータは得られていないため今後検討が必要である。この結果は辻本・北村<sup>11)</sup>と一致しており、柔軟植生が折れ曲がり高さによって流れ抵抗係数は減少することがわかった。これらの結果から、柔軟植生流れでは植生の折れ曲がり高さ  $\bar{h}_d/h$  が流れ抵抗を支配する重要パラメータであることがわかった。

## 2.3 柔軟植生の変形と抵抗則モデル

前節で示したように柔軟植生流れでは植生の折れ曲がり高さによって流れ場の抵抗係数が大きく変化する。これまで多くの研究者によって植生の折れ曲がり高さを用いて柔軟植生流れの抵抗係数を予測計算するモデルが提案されている。本節では代表的な柔軟植生抵抗則研究<sup>27)</sup>を紹介する。

Kouwen & Unny<sup>2)</sup>は次元解析を行って、柔軟植生の抵抗則を次式で表した。

$$\begin{aligned} \frac{U_m}{U_*} &= \Phi \left[ \frac{h}{(mEI / \rho g HS)^{1/4}}, \frac{h_d}{h}, \frac{h_d}{H} \right] \\ &= \Phi \left( B_h, \frac{h_d}{h}, \frac{h_d}{H} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$H$ は水深。次元解析から柔軟植生の抵抗則はたわみ高さ

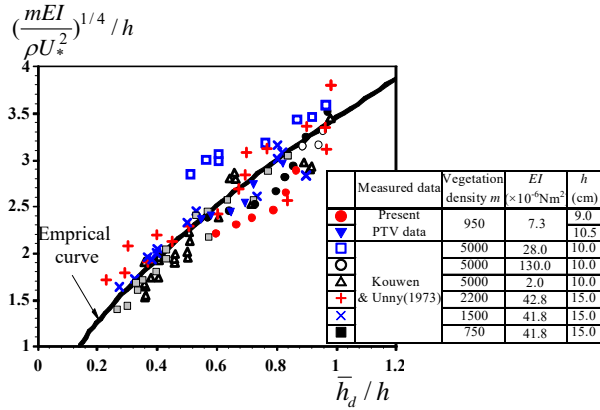


図4 Kouwen & Unny<sup>2)</sup>の抵抗則

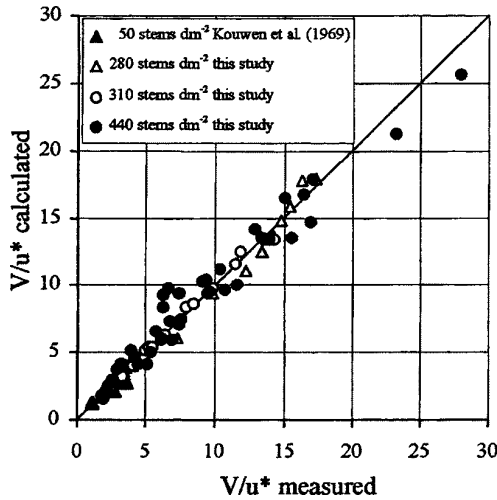


図5 Carollo らの抵抗則(引用文献<sup>7)</sup>)

と植生パラメータ  $B_h = h / (mEI / \rho gHS)^{1/4}$  によって決定される。Kouwen & Unny<sup>2)</sup>は1本の植生ではなく、植生群落の抵抗を表すパラメータとして  $mEI$  を用いた。すなわち、植生密度  $m$  が増加するのは1本の植生の剛性  $EI$  が大きくなるのと同じ効果をもつ。

Kouwen & Unny<sup>2)</sup>は柔軟植生のたわみ高さ  $\bar{h}_d / h$  は植生の剛性  $EI$  の関数として次式で計算できることを示した。

$$\frac{\bar{h}_d}{h} = \frac{3.57}{h} \left( \frac{mEI}{\rho U_*^2} \right)^{1/4} - 0.286 \quad (6)$$

図4は柔軟植生の折れ曲がり高さ  $\bar{h}_d / h$  を無次元パラメータ  $(mEI / \rho gHS)^{1/4} / h$  に対して示したものである。図から実験データは経験式(6)に従っており、式(6)から植生のたわみ高さを計算することが可能であることがわかる。式(6)を変形すると次式ようになる。

$$mEI = \frac{1}{3.57} (\bar{h}_d + 0.286h)^4 \rho U_*^2 \quad (7)$$

実河川において植生長さ  $h$ 、たわみ高さ  $\bar{h}_d$ 、植生密度  $m$ 、柔軟植生の剛性を計測することで摩擦速度を計算するこ

とができる。

次に Carollo<sup>7)</sup>は植生の剛性  $EI$  の影響は植生の折れ曲がり高さ  $h_d$  に含まれるとして植生の剛性  $EI$  を用いずに柔軟植生の抵抗則を次式で表した。

$$\frac{U_m}{U_*} = f \left( \frac{U_* h_d}{v}, \frac{h}{h_d}, \frac{H}{h_d}, m \right) \quad (8)$$

$$\frac{U_m}{U_*} = A_0(m) \left( \frac{h}{h_d} \right)^{a1} \left( \frac{U_* h_d}{v} \right)^{a2} \left( \frac{H}{h_d} \right)^{a3} \quad (9)$$

$a1, a2, a3$  は定数(Carollo<sup>7)</sup>を参照)。  $A_0(m)$  は植生密度の関数で、  $m \leq 50$  本/dm<sup>2</sup> では

$$A_0 = 43.4m^{-1.0521} \quad (10)$$

$m \geq 280$  本/dm<sup>2</sup> では

$$A_0 = 0.0275m^{2.3701} \quad (11)$$

となる。図5に式(9)から計算した摩擦速度と水路勾配から得られた摩擦速度を比較している(Carollo<sup>7)</sup>)。植生密度によらず、良好な一致を得ている。

#### 2.4 柔軟植生流れの流速分布

本節では洪水時の柔軟植生流れの流下能力を把握するために時間平均流速分布について述べる。柔軟植生流れの流速分布はかぶり水深比  $H/h$  によって大きく異なる。

まず、非水没状態(Emergent vegetation :  $H/h=1.0$ )の植生流れでは力のつりあい式は重力=植生抗力となり、次式で表される。

$$\rho g h I_e = \frac{1}{2} \rho C_D a h U^2 \quad (12)$$

$C_D$  は植生の抗力係数、  $I_e$  は河床勾配。非水没状態での植生流れでは流速分布は一様となり、流速値は次式で計算される。

$$U = \sqrt{\frac{2gI_e}{C_D a}} = const. \quad (13)$$

次に、全水没状態(Submerged vegetation :  $H/h>1.0$ )の植生流れでは植生内部( $y/h<1.0$ )と植生外部( $y/h>1.0$ )の2層に分けて考えることができる(Two-Subzone Model)。

植生内部( $y/h<1.0$ )では植生抗力の影響で流速が低減するため、流速分布は対数則分布には従わない。植生内部の流速分布としてRaupach & Thom<sup>12)</sup>は一次拡散モデルに基づいた次式を報告している。

$$U / U_h = \exp \left( \alpha \left( \frac{y}{h} - 1 \right) \right) \quad (14)$$

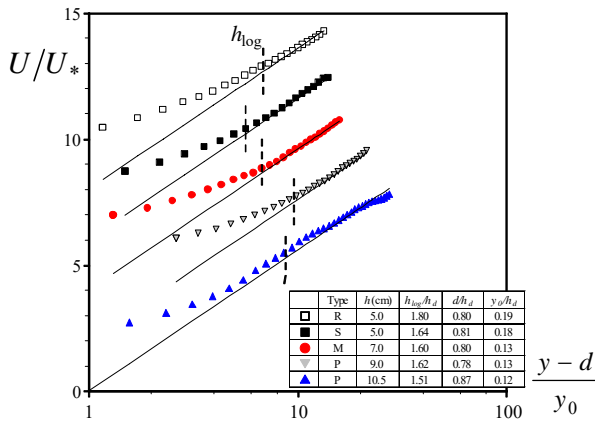


図6 対数則分布との比較

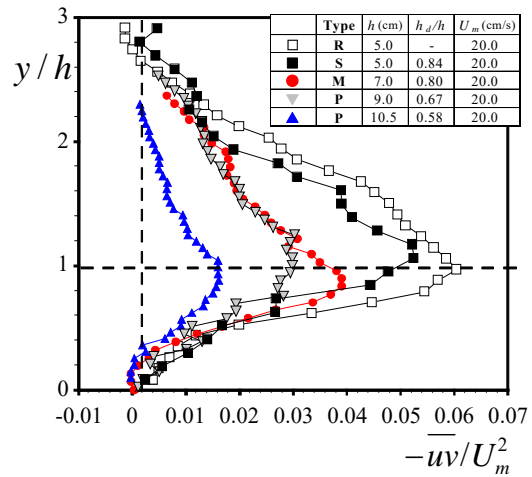


図8 レイノルズ応力分布

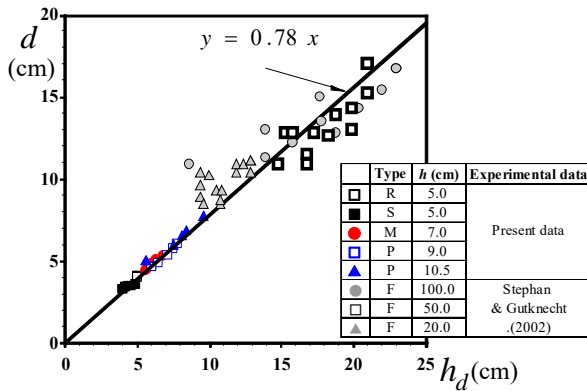


図7 柔軟植生変形と原点移動量

ここで  $\alpha = (C_D a h^3 / (4l^2))^{1/3}$  は実験定数、 $U_h$  は植生先端 ( $y/h=1.0$ ) での時間平均流速、 $l$  は混合距離。一方、植生外部では植生抗力の影響が少なく、対数則分布が成立する。

$$U/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y-d}{y_0} \right) \quad (15)$$

ここで  $\kappa$  はカルマン定数、 $d$  は原点移動量、 $y_0$  は粗度長さである。図6に柔軟植生ケースについて  $U/U_*$  を対数則分布式(15)と比較した。植生長さによらず植生層外部では対数則分布にしたがっている。図中の  $h_{log}$  は Log-law zone の下端高さを表している。Log-law zone の下端高さ  $h_{log} / \bar{h}_d$  の値は1.6でほぼ一定で、またこの値は剛体植生の値1.8に近い値である。式(15)中の原点移動量  $d$  は次式で計算され、運動量の浸透厚さに対応している。

$$d = \int_0^h (y \frac{\partial \bar{u}v}{\partial y}) dy / \int_0^h (\frac{\partial \bar{u}v}{\partial y}) dy \quad (16)$$

図7は原点移動量  $d$  を柔軟植生のたわみ高さ  $\bar{h}_d$  に対してプロットしたものである。図から原点移動量  $d$  と植生のたわみ高さ  $\bar{h}_d$  に線形関係がみられる ( $d/\bar{h}_d=0.78$ : Stephan & Gutknecht<sup>4)</sup>のデータでは  $d/\bar{h}_d=0.83$ )。原点移動量は植生長さが大きくなると増加している。また粗度長さ

の値は値を平均すると  $y_0 / \bar{h}_d = 0.14$  となった(Nepf & Vivoni<sup>18)</sup>のデータでは  $y_0 / h = 0.11$ )。

### 3 柔軟植生流れの乱流構造

#### 3.1 柔軟植生の乱流と組織渦構造

本節では柔軟植生流れの乱流構造について述べる。柔軟植生の変形、揺動によって植生層厚が瞬間的に変化するため、乱流構造は大きく変化すると考えられる(室田・福原<sup>10)</sup>, 辻本・北村<sup>11)</sup>)。

図8には柔軟植生流れのレイノルズ応力分布を示す。比較のため剛体植生の結果<sup>19)</sup>を併示している。柔軟植生ケースでは剛体植生ケースよりもレイノルズ応力のピーク値が小さくなっている。

柔軟植生ケースでは植生長  $h$  が大きなケースほど植生先端部でのピーク値が減少し、ピーク位置も下方にシフトしている。これは植生長が大きなケース ( $h=9.0, 10.5$ cm) では植生が大きく折れ曲がり、植生内部への運動量輸送が遮蔽されるためである。

柔軟植生流れは剛体植生流れとは異なった運動量輸送メカニズムを有しており、大規模組織渦構造も異なると考えられる。以下では未解明点が多く存在する柔軟植生の組織渦構造を調べ、剛体植生と比較する。PIV法による多点流速計測結果を用いれば、組織渦のマクロスケールは流下方向の積分スケール  $L_u$  として次式から評価することができる。

$$L_u = \int_0^\infty \frac{\overline{u(x_0, y_0, t_0) \times u(x_0 + x, y_0, t_0)}}{\overline{u'(x_0, y_0) \times u'(x_0 + x, y_0)}} dx \quad (17)$$

図9にMonamiケース ( $h=7$ cm,  $U_m=20$ cm/s) の組織渦の長さスケール  $L_u$  分布を示す。植生内部 ( $y/h < 1.0$ ) でも  $L_u/h$  は 0.8-1.0 程度の値をもつため、植生内部に組織渦が浸

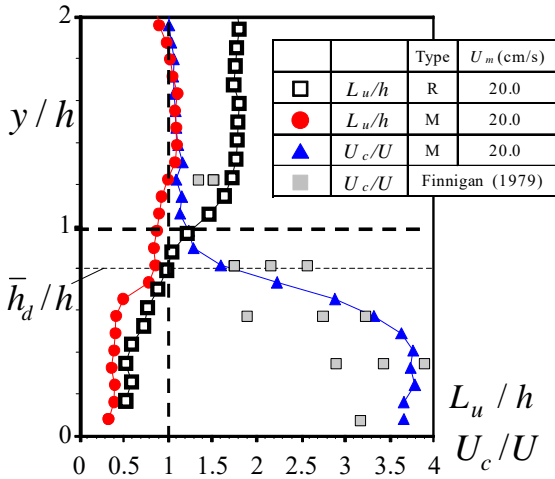


図9 平均渦の長さスケールと移流速度(Monami)

透していると考えられる。柔軟植生流れでは  $L_u/h$  は植生先端部で 1.0 程度になり、組織渦の長さスケールは植生長さ  $h$  にほぼ等しいことがわかった。これに対して、剛体植生流れでは長さスケール  $L_u/h$  は 1.5-2.0 程度なので、柔軟植生流れでは植生が折れ曲がるため植生層厚が小さくなり、組織渦スケールが小さくなっている。また図9には柔軟植生流れの Monami ケースにおける組織渦の移流速度  $U_c(y)$  の鉛直分布を示す。組織渦の移流速度は次式で計算される。

$$U_c = \frac{\Delta x}{\tau_{max}} \quad (18)$$

$\tau_{max}$  は固定点から流下方向  $x$  に  $\Delta x$  ずらした移動点において時空間相関  $C_{uu}$  が最大となる遅れ時間である。 $U_c(y)$  の値は時間平均流速  $U(y)$  で無次元化している。比較のため Finnigan<sup>20)</sup> の大気植生の結果も併示した。 $U_c/U$  は植生内部で急激に増加する傾向がみられ、注目される。これは時間平均流速  $U(y)$  が植生内部で低減されるのに対して、植生層に浸透した大規模渦の移流速度  $U_c(y)$  は植生内部でもほぼ一定値をとるためであると考えられる。植生先端付近では  $U_c/U$  は 1.5 となり、Finnigan<sup>20)</sup> の現地計測結果と一致している。

### 3.2 流れと植生揺動の相互作用

植生境界で組織渦が発生すると、流下時に柔軟な植生を押し倒すため植生の組織的揺動(Monami)が生じる(日野<sup>14)</sup>。本節では植生の揺動特性について述べる。著者らのグループ<sup>21)</sup>では柔軟植生の先端に接着した蛍光球にレーザーライトシート(LLS)を照射することで、植生先端変位をPTV計測した(図10)。これまでの研究で植生変位と組織渦による流速変動の相関について詳細に考察したものはあまりみられない。Siniscalchi & Nikora<sup>13)</sup>は

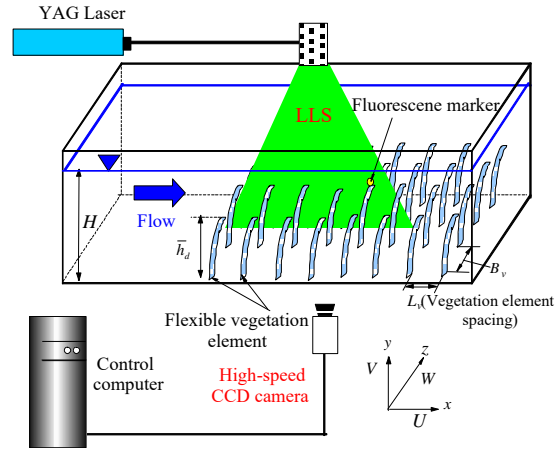


図10 柔軟植生先端変位のPTV計測

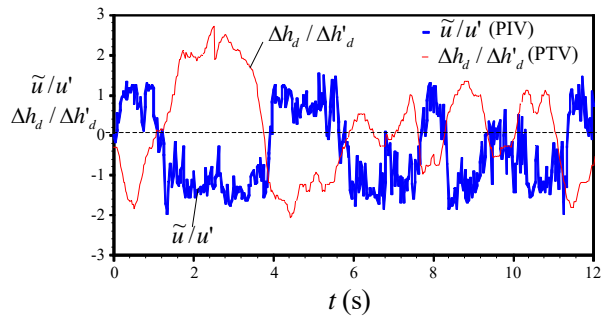


図11 柔軟植生先端変位と瞬間主流速の時系列データ

柔軟植生にかかる抗力と近傍の流速を同時計測し、抗力値は大スケールの乱流変動成分と高い相関があることを指摘している。

PIVとPTV法を併用して植生変位と瞬間流速を同時計測すれば、植生揺動と流速の相関関係について直接計算し、評価することができる。図11に植生長  $h=7\text{cm}$  の Monami ( $U_m=20\text{cm/s}$ ) の流速基準点(植生先端部)の瞬間主流速  $\tilde{u}$  と柔軟植生折れ曲がり高さ  $h_d$  の時系列データを示す。図から主流速  $\tilde{u}$  が増加すると植生が大きいため、 $h_d$  が減少している。 $\tilde{u}$  と  $h_d$  の波形はほぼ同じで、逆位相であるため、植生変位と流速の相関は大きいと考えられる。

植生変位と流速の相関についてさらに詳細に解析するために図12に流速基準点の瞬間主流速  $\tilde{u}$  と柔軟植生折れ曲がり高さ  $h_d$  のコヒーレンス  $Coh_{u,h_d}(f)$  を示す。図から低周波側において流速と植生変位のコヒーレンスは大きくなっており、注目される。これは低周波の大規模渦によって Monami が起きているためである。また植生1(基準点)から植生4(基準点から距離  $\Delta L_v / L_v = 3.0$  だけ離れている)までは植生変位と流速との相関が高く、揺動位相が一致している。この植生1から植生4までの距離  $\Delta L_v = 3L_v = 9.6\text{cm}$  は図9で評価した大規模渦のス

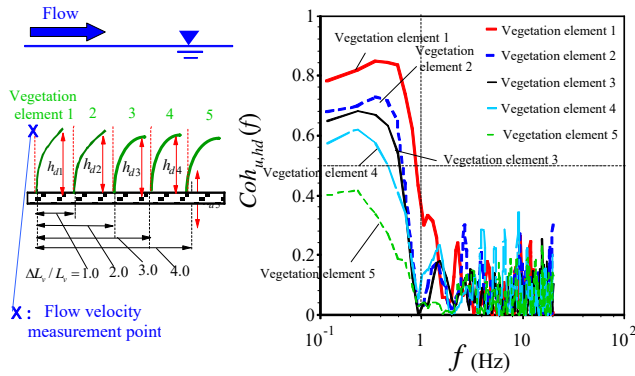


図 12 柔軟植生揺動と流速変動のコヒーレンス解析

ケール  $L_u$  と同程度の大きさとなった。これに対して、植生 5 の変位と基準点の主流速変動の相関は小さい。

図 1(c)のように組織渦の通過時に渦発生領域内にある植生(植生 1~4)の揺動位相は一致すると考えられる。これに対して、組織渦スケール  $L_u$  より十分に大きな  $\Delta L_v = 4.0L_v = 12.8\text{cm}$  だけ離れた植生 5 の折れ曲がり高さ  $h_d$  と基準点の流速変動  $\tilde{u}$  の相関は小さくなっている。この結果から揺動位相が一致する植生の本数は組織渦スケールの大きさによって変化する。すなわち、Monami 発生時には組織渦が植生の内部に浸透することによって、複数の植生要素が同時に揺動していることが考えられる。

### 3.3 Monami 現象の横断方向位相差

植生流れの組織渦構造は横断方向位相差をもつことが知られている。池田ら(1996)<sup>17)</sup>はスキャンニング PIV を用いて組織渦の 3 次元構造を計測し、長軸が前傾した楕円型の渦が植生境界で発生し、渦の下面(水平面)では互いに逆回転している渦対が存在することを明らかにしている。

Ghisalberti & Nepf<sup>22)</sup>は横断方向位相差を持った組織構造を Sub-channel 構造と名付けた。写真 1 は植生境界部に染料注入して組織渦構造を可視化したものである。写真(左)手前で Sweep が発生し、奥で Ejection が発生しているのがみられる。Sub-channel 構造は時間経過とともに変化し、写真(右)では手前で Ejection が発生し、奥で Sweep が発生している。これまでの植生研究で Sub-channel 構造を計測し、横断方向スケールや位相差について調べたものはあまりみられない。

著者らのグループ<sup>23)</sup>では複数列の柔軟植生変位を同時計測するために、柔軟先端部の蛍光球に列ごとに異なる波長域の色(青色:波長 450nm と黄色:波長 570nm)の蛍光塗料を塗布した(2 色 PTV 法)。水路上方からブラックライトを照射し、側方に設置した 2 台の高速度 CCD カメラでデジタル撮影した(図 13)。2 台のカメラはパルス



写真 1 植生流れの Sub-channel 構造(引用文献<sup>22)</sup>)

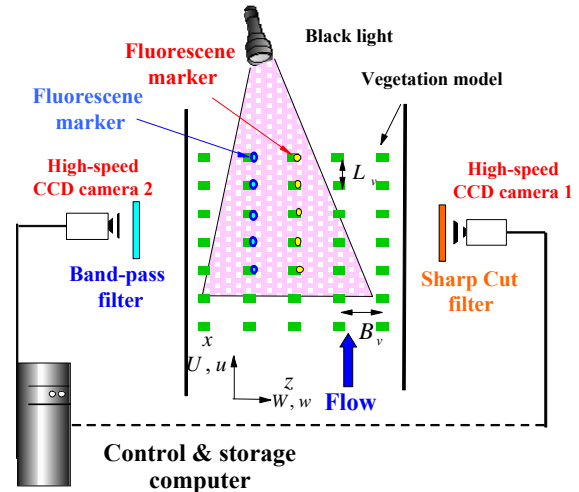


図 13 2 色 PTV 計測システム

ジェネレータからのトリガー信号により同期をとっている。一方のカメラにはバンドパス(BP)フィルターを装着し青色の蛍光球の動きのみを PTV 追跡でき、また一方のカメラにはシャープカット(SC)フィルターを装着し黄色の蛍光球のみを撮影した。

図 14 は 2 本の植生折れ曲がり高さ  $h_d$  の時系列変化を表した図である。 $\Delta B_v / B_v$  は 2 本の植生要素間の横断方向距離を示す(図 14(c))。隣り合う植生( $\Delta B_v / B_v = 1.0$ )では 2 本の植生高さ  $h_d$  がほぼ同時に大きく減少している瞬間がみられ、Sweep が通過して 2 本の植生が同時にたわんでいる。また Ejection 発生時には 2 本の植生高さ  $h_d$  が増加しており、2 本の植生はほぼ同時に揺動している。これに対し、十分に離れた 2 本の植生( $\Delta B_v / B_v = 4.0$ )では  $t=0.0\text{s}$  で一方の植生(Veg.5)が Sweep によってたわんでいる瞬間に、一方の植生(Veg.1)が Ejection によって起き上がっている。これらの結果から Monami 現象は横断方向位相差のある Sub-channel 構造<sup>23)</sup>をもつことがわかった。

Monami の横断方向位相差を定量的に評価するために図 15 に横断方向 2 列の柔軟植生揺動のコヒーレンス  $Coh_{hd,hd}(f)$  を示す。 $\Delta B_v / B_v$  は植生要素間の横断方向距離を示す(図 14(c))。Monami ケースでは隣り合う植生( $\Delta B_v / B_v = -1.0, 1.0$ )では低周波域( $f \leq 1.0\text{ Hz}$ )でコヒーレンスが大きく高周波域( $f \geq 1.0\text{ Hz}$ )のコヒーレンスが

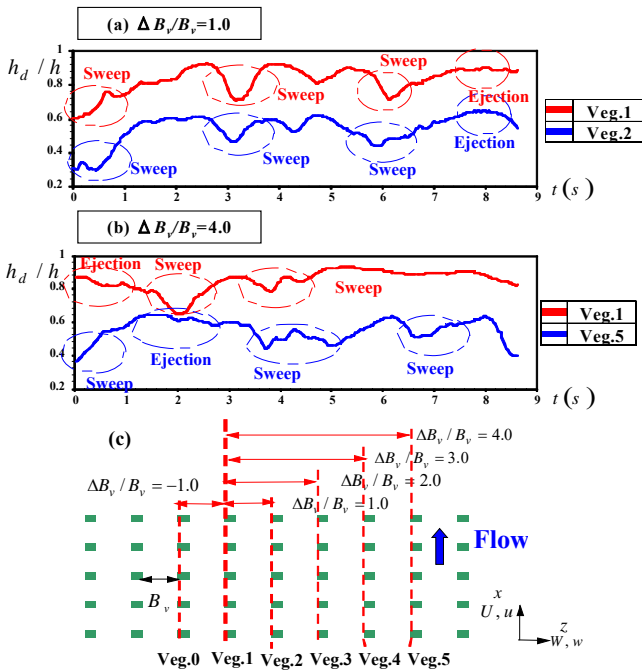


図 14 Monami 現象の横断方向位相差

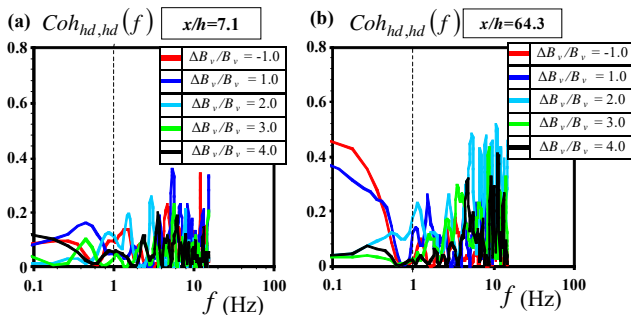


図 15 横断方向の植生揺動コヒーレンス  
(a)Swaying, (b)Monami

小さいため、大規模渦(渦の横断方向スケール: $L_z=0.7h$ )によって3列の植生がほぼ同位相で揺動している。これは目視で観察した結果とも一致している。植生間距離が大きくなると( $\Delta B_v / B_v = 2.0, 3.0, 4.0$ )低周波域のコヒーレンスが小さくなり、揺動の横断方向位相差がみられる。これに対し、Swaying ケースではコヒーレンスの値が小さく、植生は横断方向にも個々に揺動している。

4 おわりに

本論文では柔軟植生の変形、揺動が流れ場に与える影響について解説を行った。2 節では柔軟植生変形と抵抗則(平均流構造)について述べ、さらに代表的な植生抵抗則研究のレビューを行った。3 節では柔軟植生流れの乱流構造に着目し、植生揺動と流れの相互作用、組織的揺動(Monami)の発生メカニズムについて述べた。しかしながら、柔軟植生流れは組織渦の3次元構造など未解

明点がまだ多く存在し、今後研究発展することが期待される。そのためには農学分野・機械工学分野の乱流研究の知見を取り入れるなど、研究領域の垣根を超えた協力が必要不可欠である。

引用文献

- 1) 玉井信行, 奥田重俊, 中村俊六: 河川環境評価法, 東京大学出版会, (2000)
- 2) Kouwen, N. and Unny, T.E.: Flexible roughness in open-channels. *ASCE J. Hydraulics Div.* 99 (HY5) (1973) 713-727.
- 3) Kouwen, N. and Li, R. : Biomechanics of vegetative channel linings. *ASCE J. Hydraulics Div.* 106 (HY6) (1980) 1085-1103.
- 4) Stephan, U. and Gutkcht D.: Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, *J. of Hydrology*, 269 (2002) 27-43
- 5) Jarvela, J. : Flow resistance of flexible and stiff vegetation: flume study with natural plants, *J. of Hydrology*. 269 (2002) 44-54
- 6) Velasco, D., Bateman, A. Redondo, J., Demedina, V. : An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings., *Flow Turbulence and Combustion* 70 (2003) 69-88.
- 7) Carollo, F.G, Ferro, V. and Termini, D. : Flow Resistance Law in Channels with Flexible Submerged Vegetation, *J. of Hydr. Eng.*, 131 (2005) 554-564
- 8) 林 建二郎, 今野 政則: 流れによる変形や振動を考慮した河道内植生に作用する流体力と抵抗則の評価, *水工学論文集*, 51 (2007) 1231-1236
- 9) Nikora, V., Lamed, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M. : Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: field study, *J. of Hydr. Eng.*, 134(9) (2008) 1326-1332.
- 10) 室田明・福原輝幸: 水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, *土木学会論文報告集*, 338 (1983) 97-103
- 11) 辻本哲郎, 北村忠紀: 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, *土木学会論文集*, 607/II-45 (1998) 29-44.
- 12) Raupach, M. R. and Thom, A.S. : Turbulence in and above Plant Canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 13 (1981) 97-129.
- 13) Siniscalchi, F., Nikora, V. : Dynamic reconfiguration of

- aquatic plants and its interrelations with upstream turbulence and drag forces. *J. Hydraulic Res.*, 51 (2013) 46-55.
- 14) 日野幹雄: 植生の大変形弾性振動を考慮した穂波発生メカニズムと物質・エネルギー交換過程の研究, 科学研究費補助金(基盤研究(C) (2))研究成果報告書, (2000)
- 15) Ghisalberti, M. and Nepf, H. : Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, *J. of Geophysical Res.*, 107 (2002) 1-11.
- 16) Ghisalberti, M., Nepf, H. : The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies, *Environ. Fluid Mech.*, 6 (2006) 277-301.
- 17) 池田駿介, 金沢稔, 太田賢一: 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の 3 次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, 515/II-31 (1996) 33-43.
- 18) Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. : Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow, *J. of Geophysical Res.* 105 (2000) 28547-28557.
- 19) Nezu, I., and Sanjou. M.: Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *J. of Hydro-environment Res.*, 2 (2008) 62-90.
- 20) Finnigan, J. : Turbulence in waving wheat: Mean statistics and Honami. *Boundary-Layer Meteor.* 16 (1979) 181-211.
- 21) Okamoto, T., Nezu, I. and M. Sanjou: Flow-vegetation interactions: length-scale of the “monami” phenomenon, *J. of Hydraulic Res.* 54 (2016) 251-262
- 22) Ghisalberti, M. and H. Nepf. : Mass transfer in vegetated shear flows. *Environ. Fluid Mech.*, 5(6) (2005) 527-551
- 23) 岡本隆明・青木成太・横山博行・戸田圭一: 柔軟植生群落流れにおける藻波現象のスケール変化と横断方向位相差に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 71, No.4 (2015) I\_643-I\_648