藻波発生時の柔軟植生の変形解析と 流れ抵抗変化に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION ANALYSIS OF FLEXIBLE VEGETATIONS AND FLOW RESISTANCE IN MONAMI CANOPY FLOW

岡本隆明¹, 瀬津家久², 山上路生³

Takaaki Okamoto, Iehisa Nezu 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フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 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)

A lot of aquatic plants are observed in actual rivers and they have a potential to improve water quality. A large-scale coherent vortex is generated near the vegetation edge, which dominate the momentum and scalar transport. Thus, estimating the flow resistance of vegetated flows is of great importance in river management. In such vegetated open-channel flows, both the geometry of the vegetation elements (shape, size, flexibility and vegetation density) and turbulence characteristics affect the hydrodynamic resistance significantly.

However, any important relation between the vegetation motion and the flow resistance property have not been yet established. Therefore, in the present study, we highlighted these important topics and measured the instantaneous velocity structure and coherent motion in open-channel flows with flexible vegetation by using PIV-PTV technique. As the results, the hydro-mechanic interaction between the flow and flexible plant motion was revealed.

Key Words : *monami phenomena, flexible vegetation, flow resistance, deformation analysis, PIV, PTV*

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¹⁾. 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に関する研究は国内外で数多く行われている.

Kouwenら(1969)²⁾は, 水路底面に短冊状の柔軟植生を配置し, ピトー管を用いて, 植生の流速分布への影響を調べ, 植生層外部において対数則分布が成立することを発見した. Stephan & Gutknecht (2002)³⁾は超音波流速計(ADV)を用いて柔軟植生場の抵抗特性と植生高さの関係を調べた. 流速計測結果から植生高さが大きくなると, 対数則分布の原点移動量が線形的に増加することを報告している.

Righetti (2008)⁴⁾ は柔軟植生流れにおいてADVによって流速3成分を同時計測し, 平均流構造と乱れ構造を調べた. 時間平均操作と空間平均操作を導入し(Double averaging method: DAM), 平均流速, 植生密度, 植生の剛性などのパラメーターによって植生先端部の混合層の発達が支配されることを指摘した.

一方, わが国においては辻本ら(1995)⁵⁾は剛体植生と柔軟植生を対象に水路実験と数値解析を行い, 柔軟植生流れでは植生が折れ曲がることで流れ抵抗が減少することを示した. 大本ら(2006)⁶⁾は柔軟植生を用いて植生群落の配置による流れ抵抗特性・水面変動特性の変化を解明した.

このように植生流れについては多くの研究者によって様々な知見が得られている. 特に柔軟植生流れでは植生が流れによって変形するため, 植生の変形形状を考慮して抵抗則を評価する必要がある. しかしながら, これらの研究では植生変位の時系列データを計測していない. 著者ら(2009)⁷⁾は柔軟植生

表-1 実験条件

Type	Φ	H (cm)	h (cm)	$\bar{h}$ (cm)	H/h	U_{∞} (cm/s)	U_{∞} (cm/s)	Re	Fr	Classification of plant motion	
F5	0.061	15.0	5.0	4.9	3.0	10.0	2.4	21000	0.08	Swaying(S)	
				4.6		12.0	2.8	25200	0.10		
				4.4		15.0	3.4	31500	0.12		
				4.2		17.0	3.9	35700	0.14		
				4.0		20.0	4.4	42000	0.16	Monami(M)	
				3.6		25.0	5.3	52500	0.21		
				3.4		30.0	5.9	63000	0.25		
				3.0		35.0	6.3	73500	0.29		
F7		21.0	7.0	6.8		10.0	2.3	21000	0.07	Swaying(S)	
				6.3		12.0	2.7	25200	0.08		
				6.0		15.0	3.3	31500	0.10		
				5.8		17.0	3.6	35700	0.12		
				5.6		20.0	4.0	42000	0.14	Monami(M)	
				5.1		25.0	4.5	52500	0.17		
				4.5		30.0	4.7	63000	0.21		
				4.0		35.0	5.0	73500	0.24		
F9		27.0	9.0	7.8		10.0	2.1	27000	0.06	Swaying(S)	
				7.5		12.0	2.5	32400	0.07		
				7.1		15.0	2.9	40500	0.09		
				6.5		17.0	3.1	45900	0.10		
				6.0		20.0	3.3	54000	0.12	Monami(M)	
				5.4		25.0	3.6	67500	0.15		
				8.6		10.0	2.0	31500	0.06		Swaying(S)
				7.6		12.0	2.3	37800	0.07		
F10.5		31.5	10.5	7.3		15.0	2.7	47250	0.09	Monami(M)	
				6.8		17.0	2.9	53550	0.10		
				6.1		20.0	3.0	63000	0.11	Prone(P)	
				5.8		25.0	3.2	78750	0.14

図-1 柔軟植生流れの模式図

の揺動をPTV計測し、藻波(Monami)発生時に揺動が運動量輸送に与える影響を解明したが、流れ抵抗特性に及ぼす植生変形効果については十分な知見が得られていないのが現状である。また柔軟植生の群体運動である藻波現象と組織渦による流速変動の関係についても未解明点が多く存在する。このような研究は柔軟植生の揺動を再現して流れ場を数値解析する研究に非常に役立つと考えられる。そこで本研究では特にPIV-PTV同時計測法を駆使して流速と柔軟植生変位を同時に解析し、流れ抵抗に及ぼす植生変形・揺動効果を定量評価する。さらに、藻波発生時の植生変形を解析し、植生の揺動位相が一致する植生の本数と組織渦スケールとの関係を明らかにする。

2. 実験装置と計測方法

図-1に柔軟植生流れの模式図を示す。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る⁷⁾。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(レイノルズ分解法)。 H は全水深、 h は柔軟植生の直立高さ、 h_d は柔軟植生の折れ曲がり高さである。

柔軟植生モデルはOHPシートを幅 $b=8\text{mm}$ 、厚さ $t=0.1\text{mm}$ の短冊状に切ったもので、アナカリスなど沈水性の有茎植物をモデル化している。植生長さを $h=50, 70, 90, 105\text{mm}$ の4通りに変化させている。水路底面に計測部を含めて8mの区間にわたって植生モデルを正方格子状に配置した。流下方向、横断方向の植生の配置間隔はそれぞれ $L_v = B_v = 3.2\text{cm}$ である。

本研究ではPIVとPTV法を併用して瞬間流速($\tilde{u}, \tilde{v}$)と柔軟植生の先端変位($\Delta x, \Delta y$)を同時計測した。瞬間流速ベクトルの算出にはPIV法を用いた。

3WのAr-ionレーザーを光源として水路上方から厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を照射し、側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。LLSの照射位置は植生要素間(Nonwake region)⁸⁾である。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40Hz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(x, y)は全水深領域を含むように30cm×30cm領域である。また柔軟植生の先端に蛍光球(直径1mm)を接着し、LLSを照射して蛍光球をPTV追跡することで柔軟植生の先端変位を計測した。

水理条件は表-1に示すように柔軟植生モデルの長さ h を系統変化させ、4種類の植生モデルを用いて計28ケース設定した。植生密度 ϕ 、かぶり水深比は $H/h=3.0$ で全ケースで一定とした。本研究の植生密度 ϕ を次式で算出した。

$$\phi = nAb/V_0 \quad (1)$$

n は体積 V_0 における植生の数で、 A は流れに垂直方向の植生要素の投影面積、 b は植生要素の幅である。

図-2 対数則分布との比較

図-3 柔軟植生変形効果と原点移動量

表中の右端の欄は植生の揺動状態を表しており、Swaying(S)は植生が個々に揺動する状態、Monami(M)は植生が組織的に揺動する状態で、Prone(P)は植生が倒伏した状態を示す。

3. 実験結果と考察

(1) 柔軟植生の抵抗支配パラメーター

柔軟植生の研究は数多くみられるが、多くは植生の流れ抵抗則を明らかにすることを目的としている。Kouwen & Unny (1973)⁹⁾は次元解析を行い、柔軟植生の抵抗則が次式で表されることを示した。

$$\frac{U}{U_*} = \Phi \left[\frac{h}{(mEI / \rho g HS)^{1/4}}, \frac{\bar{h}_d}{h}, \frac{\bar{h}_d}{H} \right] = \Phi \left(B_h, \frac{\bar{h}_d}{h}, \frac{\bar{h}_d}{H} \right) \quad (2)$$

m は単位面積あたりの植生の本数、 EI は植生の曲げ剛性、 $\bar{h}_d$ は柔軟植生の時間平均折れ曲がり高さ、 S は水路勾配である。次元解析(2)式から、柔軟植生の抵抗則は植生の曲げ剛性、植生密度を示す無次元パラメーター $B_h = h / (mEI / \rho g HS)^{1/4}$ と植生折れ曲がり高さ $\bar{h}_d$ によって決定される。本研究では曲げ剛性 EI や植生の本数 m は一定であるため、植生がたわんで変形することによる抵抗特性の変化について考察する。

(2) 平均流速分布と抵抗則

植生流れの抵抗則を解明するには、植生外部の流速分布を把握する必要がある。Nezu & Sanjou (2008)⁸⁾は植生層外部の流速分布と次式の対数則分布を比較している。

$$U/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y-d}{y_0} \right) \quad (3)$$

ここで d は原点移動量、 y_0 は粗度長さである。摩

擦速度 U_* はレイノルズ応力のピーク値から算出した。Nezu & Sanjou (2008)⁸⁾の剛体植生ケースの結果では原点移動量は $d = 0.8h$ 程度になることが示されている。これに対して、本研究のような柔軟植生流れでは植生長さ h が時間的に変化するため流れ場は複雑になり、原点移動量 d や粗度長さ y_0 に与える影響は大きいと考えられる。

図-2に柔軟植生($h=5.0, 7.0, 9.0, 10.5(\text{cm})$)の U/U_* を対数則分布(3)と比較した。図中には比較のため Nezu & Sanjou (2008)⁸⁾の剛体植生の結果もプロットした。どの植生長のケースでも植生層外部で流速分布は対数則分布と一致しているのが観察される。図中の $h_{\log}$ はLog-law zoneの下端高さを表しており、Nezu & Sanjou (2008)⁸⁾はLog-law zoneでは植生の影響が少なく、植生密度によらずLog-law zoneの下端高さは一定($h_{\log}/h=1.8$)であることを指摘した。本研究の柔軟植生では植生長によらず $h_{\log}/\bar{h}_d$ の値は1.6でほぼ一定であり、植生の折れ曲がり高さ $\bar{h}_d$ によってLog-law zoneの大きさが変化することがわかった。

次に式(3)の原点移動量 d 、粗度長さ y_0 に与える柔軟植生の变形効果を定量的に評価する。原点移動量 d はレイノルズ応力の植生内部への浸透厚さとして、次式で計算される¹⁰⁾。

$$d = \int_0^h \left(y \frac{\partial \bar{u}v}{\partial y} \right) dy / \int_0^h \left(\frac{\partial \bar{u}v}{\partial y} \right) dy \quad (4)$$

図-3は原点移動量 d を柔軟植生の折れ曲がり高さ $\bar{h}_d$ に対してプロットしたものである。図から原点移動量 d と植生の折れ曲がり高さ $\bar{h}_d$ はほぼ線形関係($d/\bar{h}_d=0.78$)になっており、原点移動量は植生長さ $\bar{h}_d$ が大きくなると増加する傾向がみられる。この線形関係はStephan & Gutknecht (2002)³⁾やNepf & Vivoni (2000)¹⁰⁾の柔軟植生の実験結果でもみられ、本研究の値($d/\bar{h}_d=0.78$)はNepf & Vivoni (2000)¹⁰⁾の

図-4 レイノルズ応力分布

図-5 柔軟植生変形による抵抗係数の変化

図-6 平均渦の長さスケールと移流速度(Monami)

$d/\bar{h}_d=0.7$, Stephan & Gutnecht (2002)³⁾の $d/\bar{h}_d=0.83$ と良好に一致している. また図-2の表中には粗度長さ y_0 の値を併示した. 本研究の粗度長さの値を平均すると $y_0/\bar{h}_d=0.14$ で, この値はNepf & Vivoni(2000)¹⁰⁾の $y_0/\bar{h}_d=0.11$ と同程度の大きさをもつ.

これらの結果から柔軟植生流れでは対数則分布のパラメータ d , y_0 は植生の折れ曲がり高さ $\bar{h}_d$ によって変化することが明らかになった. また流れ抵抗を把握する上で $\bar{h}_d$ が重要パラメータであることが実験値から確認できた.

(3) 柔軟植生の变形と抵抗則

図-4には柔軟植生流れのレイノルズ応力分布を示す. 植生長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.

次に植生変形効果による流れ抵抗の変化を定量評価するため, 図-5には摩擦抵抗係数 $f=8(U_*/U_m)^2$ を柔軟植生のたわみ高さ $\bar{h}_d/h$ についてプロットした. 図から植生がたわんで $\bar{h}_d$ が減少すると抵抗係数 f は小さくなる傾向がみられる. すなわち, SwayingよりMonamiケースでは植生がたわ

むため, 流れ抵抗が小さくなることがわかった. これはJarvela (2002)¹¹⁾の結果と一致している.

またKouwen & Unny (1973)⁹⁾は植生が倒伏したProne状態では境界層に似た特性を示すとしているが, 本研究ではProneケースが少なく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.

(4) 植生変形解析による藻波スケールの抽出

これまでの解析結果から植生変形効果によって抵抗則が大きく変化することがわかった. 次に植生の揺動効果について考察する. 従来の植生研究では, 植生変位の時系列データがないため, Monamiの流下方向スケールや揺動が一致する植生の本数については未解明点が多い. そこで本節ではPTV計測結果から植生変形を解析し, 植生揺動の位相のずれからMonamiスケールを評価することを試みる.

まず藻波の発生要因と考えられる組織渦の特性を明らかにする. 本研究ではPIV法による多点計測を行っているため, 組織渦のマクロスケールは流下方向の積分スケール L_x として次式から評価することができる.

$$L_x = \int_0^\infty \frac{u(x_0, y_0, t_0) \times u(x_0 + x, y_0, t_0)}{u'(x_0, y_0) \times u'(x_0 + x, y_0)} dx \quad (5)$$

図-6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_x 分布を示す. L_x/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. また植生内部($y/h < 1.0$)でも L_x/h は1.0程度の値をもつため, 植生内部に組織渦が浸透していると考えられる.

また図-5にはMonamiケースにおける次式で計算される組織渦の移流速度 $U_c(y)$ の鉛直分布を示す.

$$U_c = \frac{\Delta x}{\tau_{max}} \quad (6)$$

図-7 植生揺動のコヒーレンス

図-8 瞬間主流速と植生変位の時系列

図-9 流速と植生変位の相関解析

τ_{max} は固定点から流下方向 x に Δx 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 (1979)¹²⁾ 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 (1979)¹²⁾ の現地計測結果と一致している。

次に PTV 計測結果から植生の揺動特性について考察する。 藻波発生時の植生間の位相のずれを評価するには複数の植生素の揺動相関を周波数ごとに評価する必要がある。 図-7 には $h=7\text{cm}$ の Monami ($U_m=20\text{cm/s}$) と Swaying ($U_m=10\text{cm/s}$) における 2 つの植生の x 方向変位 Δx のコヒーレンス $Coh_{\Delta x, \Delta x}(f)$ を示す。 図中の $\Delta L_v / L_v$ は 2 本の植生間の流下方向距離を表している。

$$Coh^2_{x,y}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (7)$$

$S_{xy}(f)$ は変動量 $x(t)$ と $y(t)$ のクロススペクトルである。 Monami ケースでは高周波帯 ($>1.0\text{Hz}$) でコヒーレ

ンスは小さいが、低周波帯 ($<1.0\text{Hz}$) において大きな値 ($Coh_{\Delta x, \Delta x}(f) > 0.5$) をとる。 これにより Monami ケースでは低周波の大スケール渦によって柔軟植生が群体運動していることがわかった。 これに対して Swaying ケースでは Monami ケースと比べて $Coh_{\Delta x, \Delta x}(f)$ の値が小さく、植生が個々に揺動していることが確認できる。

(5) 柔軟植生変形と瞬間流速の相関

これまでの植生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ない。 本研究の PIV-PTV 法によって植生変位と瞬間流速を同時計測しているため、植生変形と流速の相関関係について、直接計算し、評価することが可能である。 図-8 に $h=7\text{cm}$ の Monami ($U_m=20\text{cm/s}$) の流速基準点(植生先端部 図-9 を参照)の瞬間主流速 $\tilde{u}$ と植生の x 方向変位 Δx 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くなり、 Δx が増加している。 $\tilde{u}$ と Δx の波形はほぼ同じで、位相が一致しているため、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-9 に流速基準点の瞬間主流速 $\tilde{u}$ と植生変位 Δx のコヒーレンス $Coh_{u, \Delta x}(f)$ を示す。 図

図-10 Monami現象の模式図

から低周波側において流速と植生変位の相関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藻波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-6で評価した大規模渦のスケール L_x 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-9の結果から大規模渦スケールによって植生の組織的揺動スケール(Monami scale)も変化することが予測された。これについて考察するために図-10にMonami現象の模式図を示す。図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_x 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の変位 Δx 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、藻波発生時には図-6で考察したように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。

5. 結論

本研究ではPTV計測によって柔軟植生の変位を計測し、植生抵抗に与える植生の変形効果を明らかにした。さらに植生の揺動形態を解析し、藻波現象のスケールと渦スケールの関係について詳細に考察した。以下に得られた知見をまとめて示す。

- 1) 対数則分布のパラメーターや流れ抵抗係数を評価し、流れ抵抗に及ぼす植生の変形効果を定量

評価した。柔軟植生の折れ曲がり高さが流れ抵抗を把握する上で重要なパラメーターであることがわかった。

- 2) 組織渦の長さスケールと移流速度の解析結果から植生内部に大規模組織渦が浸透することによって藻波現象が発生していることがわかった。
- 3) 植生変位に低周波側で大きな相関がみられた。このことから藻波現象は低周波の大スケール渦によって発生することがわかった。
- 4) 藻波発生時の植生揺動をスペクトル解析し、複数の植生要素の揺動位相が一致していることが評価できた。また揺動の位相が一致する植生の本数は流れ場の大規模渦スケールによって変化することがわかった。

参考文献

- 1) 玉井信行, 奥田重俊, 中村俊六 (2000): 河川環境評価法, 東京大学出版会
- 2) Kouwen, N. and Unny, T.E. (1969): Flow retardance in vegetated channels. *ASCE J. of Irrigation and Drainage Div.* Vol. 95, pp.329-342.
- 3) Stephan, U. and Gutkcht D. (2002). Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, *J. of Hydrology*, Vol. 269, pp.27-43
- 4) Righetti, M. (2008). Flow analysis in a channel with flexible vegetation using double-averaging method, *Acta Geophysica.*, Vol. 56, pp.801-823.
- 5) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次(1995): 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.519-524.
- 6) 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.
- 7) 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, Vol.65, No.3, pp.190-202.
- 8) Nezu, I. and Sanjou, M. (2008): Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *Journal of Hydro-Environmen Research. IAHR*, Vol.2, pp.62-90.
- 9) Kouwen, N. and Unny, T.E. (1973): Flexible roughness in open-channels. *ASCE J. Hydraulics Div.* Vol. 99 (HY5), pp.713-727.
- 10) Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. (2000). Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow, *Jour. of Geophysical Res.* Vol.105: 28547-28557.
- 11) Jarvela, J. (2002). Flow resistance of flexible and stiff vegetation: flume study with natural plants, *J. of Hydrology*. Vol.269. pp.44-54
- 12) Finnigan, J. (1979). Turbulence in waving wheat: Mean statistics and Honami. *Boundary-Layer Meteor.* Vol.16, pp.181-211.

(2011.9.30受付)