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

FLUID FORCES AND HYDRAULIC RESISTANCE BY PLANTS DEFORMING AND OSCILLATIG IN RIVER FLOW

林建二郎1・今野政則2

Kenjirou Hayashi, Masanori Konno

¹正会員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20) 2 工 修 海上自衛隊八戸航空基地隊(〒031 八戸市大字川原木高館)

Laboratory experiments were performed to study the forces acting on flexible plants such as reed in river. The drag forces and lift forces acting on the model plants were measured by using load cells installed under the bed of open channel. Drag coefficient decreased with increase of Reynolds number because projected frontal area of plants in still water decreased with increase of incident flow velocity. The drag forces on the leaves of reed were small in the case of fast flow. The deformation of very flexible plants under the fluid flow are analyzed. Manning's n and Hydraulic permeability of plants were also estimated by using the Drag coefficient of plans deforming in fluid flow.

Key Words : Plants in river, Flexible plants, Drag force, Lift force, Deformation of plants, Manning's n, Hydraulic permeability, Reed

1.はじめに

河道内に生育している水草や樹林の抵抗特性を明らか にすることは,これら植生の洪水流に対する抵抗則や強 度特性の把握において重要である.しかし,幹や枝・葉 を有する植生の構造は複雑であり,また,流れに対する 形状変化が生じる結果,その流体力特性はまだ十分に把 握されていない.

植生が存在する開水路流れの水理に関しては多くの研究がなされてきた¹⁾. 樹冠部の抗力係数は, レイル、数や 枝葉の生育状態に大きく依存し,その実測値は0.4~1.5 となる結果が報告されている²⁾. 柔軟な植生の流れに対 する植生の変形量より推定した作用抗力をより植生粗度 の評価^{3),4)}が行われているが,植生変形が複雑な場合、 その評価は困難であり、精度的にも検討が必要である.

伊藤・新井⁵¹は,実河川における河道内樹木繁茂状況 調査も行い,得られた樹木生育密度や樹木形状特性(投 影面積)を用いて河道の合成粗度係数を算定し,洪水時 の水位計算を行った.樹木密度が0.00283本/m²樹木の 200m区間において,用いた抗力係数=0.6~1.2の変化で 水深0.9mの差が生じる評価結果を報告している.

林ら⁶は、開水路幅全域Iに設置された円柱群の抗力計 測を、本溜・福井⁷⁾らは開水路内にパッチ状に配置され た円柱群の抗力計測を行い、抗力係数に及ぼす樹林帯密 度や密生度⁸⁾の影響を評価している.

林ら⁹⁾および長林ら¹⁰⁾は,大型風洞内に単独設置され た樹木模型に作用する抗力の計測を行い,抗力の主流速 度に対する変化特性や樹冠部の変形特性を調べ,作用抗 力により樹木形状が変形する結果,抗力係数は主流速度 の増加に伴い減少することを明らかにした.得られた抗 力係数を用いて,洪水流れの数値解析において有用な樹 木群の合成粗度係数や透過係数の算定を試みている¹¹⁾.

油川等¹²⁾は、洪水時における河畔林の抵抗評価を目的 として、水理実験により実ヤナギの抗力係数を評価した.

本研究は,河道内に生育している実ヨシ(抽水植物)や セキショウモ、アマモ等の沈水植物模型に作用する流体 力の直接計測を行い,流れに対し傾倒や振動するこれら 植生が有する流れの抵抗特性を調べたものである.

2.実験装置および方法

実験には、長さ40m、幅0.8m、高さ1mの還流水槽を使用した.本水槽の一区間を高さ20cm底上げし、ステンレス板製の水平水路床(長さ8m)を作成した.水路床の下部に図-1,図-2に示すように分力計を設置し,実ヨシおよび沈水植物模型に作用する流体力を計測した.

ヨシ模型には,屋外栽培の実ヨシ1本(平均茎径D=0.3 cm,高さ40cm,葉7枚付き;茎部葉片面の総表面積25.7 cm²)用いた.静水時における茎部の主流方向への投影



図-1 3分力計への実ヨシの設置図

面積は A_s =12cm²である.3分力計(日計電機計測,容量 1kgf,分解能1gf(0.01N))の上部に設けた長さ約5mmの 載荷棒に片持ち梁形式でヨシ茎の下端を接続し,ヨシ全 体に作用する抗力の主流方向成分 F_x ,水路横断方向成 分 F_y ,鉛直方向成分 F_z を計測した.ヨシ葉が作用抗力に 及ぼす影響を調べるために,葉が無い状態で同様な実験 を行った.空中での分力計上の実ヨシの固有振動数は約 7Hzであった.実験水深hは,ヨシが冠水するh=44cmと 冠水しないh=25cmの2通りとした.

沈水植物模型には,曲げ剛性E/ は極めて小さく浮力 で自立している水草(セキショウモやアマモ等)と類似 な揺動特性を示す発泡部材1枚(葉長 /=50cm,葉b=1cm, 葉厚 t=0.1cm,乾燥重量=0.8gf,比重=0.16 古川電工(株) 製)を使用した.静水時における葉部の主流方向への 投影面積はA=50cm²である.上記のヨシの場合と同様に 沈水植物模型の下端を片持ち梁形式で2分力計(三計工 ンジニアリング,容量500gf,分解能1gf(0.01N))に 取り付け,植物模型全体に作用する抗力の主流方向成 分F_x,鉛直方向成分F_yを計測した.実験水深hは,植生 が静水時に冠水(沈水)可能なh=70cmとした.

開水路主流および植生後流域の流速計測には2成分の レーザー流速計(Dantec社製)を使用した.水深方向に ほぼ一様な流速分布であった.水槽側面および上部から のビデオ撮影により,流れに対する植生の変形特性およ び揺動・振動特性を調べた.

3.抽水植物(実ヨシ)の結果及び考察

(1)流れに対する実ヨシの傾倒特性

ヨシ茎先端のヨシ茎根本部からの水平変位を ζ とする、 床面からヨシ茎先端までの高さをHとする、葉7枚の場 合(葉7枚の片面総表面積=25.7cm²)と葉無しの場合に おける、 ζ とHの水路幅中央における垂直断面平均流速 U_m に対する変化特性を図 - 3,図 - 4に示す、 U_m <40cm/sの 結果は水深 h= 44cmの場合であり, U_m >40cm/sの結果は水 深 h= 25cmの場合である、平均流速 U_m の増加にともな い作用流体力が増加する結果,静水時からの傾倒量 ζ が 大きくなる、葉7枚の場合は、葉無しの場合に比べて作 用流体力が増加する結果,より大きく傾倒している、

(2) 実ヨシに作用する抗力特性



図-2 小型2分力計への沈水植物模型の設置図

葉7枚の実ヨシに作用する F_x , $F_z & F_{x7}$, F_{z7} , 葉無しの ヨシに作用する F_x , $F_z & F_{x0}$, F_{z0} とする.これら $F_x & E_z$ の 平均流速 U_x に対する変化を図 - 5に示す. F_x の正値は流 れ方向への, F_z の負値は重力方向への流体力を示す.

 U_m の増加にともない作用流体力が増加しヨシの流れ 方向への傾倒が大きくなる結果,流体力の重力方向成分 (= F_2 の負値)が顕著となっている.葉無し場合は傾倒 が小さいため F_{x0} の絶対値に対して F_{20} の絶対値は極めて 小さいが,葉7枚の場合は傾倒が大きくなるため F_{z2} の絶 対値は F_x の絶対値の約2~3割となっている.

 $F_{xd}F_{xd}$ の U_m に対する変化特性を図-6に示す. U_m =10cm/s の場合, F_{xd} は F_{xd} の2.5倍と極めて大きい.これは, U_m が 小さい場合はヨシ茎の傾倒が小さく葉もほぼ直立し葉の 流れ方向への投影面積が大きいためである. U_m の増加に 伴い F_{xd}/F_{xd} は減少し, U_m >40cm/sにおいては F_{xd} と F_{xd} の差は 無くなっている.これは, U_m が大きくなると葉が傾倒 し,葉の流れ方向への投影面積が減少するためである. 従って,平均流速 U_m が小さい場合は葉部の F_x 値に対する 影響は大きいが, U_m が大きくなると葉部の F_x 値に対する 影響は小さいことが分る。

ヨシに作用する流体力の水路横断方向成分(揚力)を F_y とし,時間変動する F_y の実効値(=標準偏差)を F_{yrms} と する.葉7枚と葉無しの F_{yrms} の比較を図-7に示す.図の 横軸には, U_n および U_n と平均茎径D-0.3cmを用いた Re数 (= $U_n \times D/$)を用いている.

葉無しの F_{yrms} は30cm/s< U_m <65cm/sで顕著に増加している.この領域における F_y の卓越周波数は,ヨシ後流域におけるレーザー流速計から評価したカルマン渦列の卓越周波数($f_s=S_tU_m/D$, S_t ;ストローハル数)と概ね一致していた.従って, F_{yrms} の増加はヨシ茎の渦励振動に起因していると考えられる¹³⁾.一方, F_{yrms} の増加現象は葉7枚の場合には見られない.これは,葉の存在によりヨシ茎の水中における減衰定数が増加する結果,ヨシ茎の渦励振動量が抑制された結果と考えられる.

ヨシの抗力係数C_{as}を(1)式を用いて算定した.

$$C_{DS} = 2F_x / (\rho A_s U_m^{2})$$
 (1)

式中のA_sには,本来傾斜に伴い減少する茎部や葉部の 主流方向への投影面積で表現すべきである.しかし,A_s が主流速度U_sの変数となると抗力係数の評価が複雑・



図-3 実ヨシのしに対するの変化特性



図 - 5 実ヨシのUmに対するFx, Fzの変化特性



困難となるので,本式中のA_sには,静水時における茎部のみの主流方向への投影面積を用いた.従って,C_Sの値には,U_sに対する茎部の傾倒や葉形の変形による投影面積変化の影響も含まれている.

*C*₆₅の*U*₆に対する変化特性を図 - 8に示す.葉7枚の*C*₆₅ は、*U*₆の小さい領域で大きくなっている.これは、小さ い場合はヨシ茎の傾倒が小さく葉もほぼ直立しているた め、葉の流れ方向への投影面積が大きくなり葉部に作用 する*F*_xが顕著となるためである.*U*₆が増加するにつれて 葉7枚と葉無しの*C*₆₅の差は少なくなっている. その原因は まだ不明確である.

葉無しのC₂₅は,茎の渦励振動が顕著となる30cm/s < U₆<65 cm/sで若干増加し,46cm/s < U₆<55cm/sおいては葉7枚の C₂₅より若干大きくなっている.これら現象は,葉無しの 場合において生じる茎の渦励振動によるものと考えられる.林ら¹³⁾は,一様流中に置かれた円柱の渦励振動時における作用抗力および揚力の増加量を計測し,円柱渦励 振動の片幅振幅量が円柱径の半分の場合,作用抗力は 1.6倍程大きくなっていることを報告している.



図-4 実ヨシのU/に対するHの変化特性



図 - 6 実ヨシのUmに対するFx7/Fx0の変化特性



4.沈水植物模型実験の結果及び考察

(1) 沈水植物模型の変形特性

h=70cm, U_m=25cm/sの場合の沈水植物模型の変形状態 を図-9 に示す.植生の根本から約4cmの間は緩やかな 曲線形でたわんでいるが,4cmから先端まではほぼ直線 形になっている.U_m=3.5cm/sと小さな場合も概ね同じ変 形状態であった.剛性をほとんどもたない沈水植生群を 有する開水路においては,穂波が発生し,そのときの植 生の揺動は高次の振動モード形を有することが水理模型 実験により明らかにされている¹⁴⁾.沈水植物模型の一枚 を単独設置した本実験においては,このような高次の振 動モードは明確に認められない.

流水時における沈水植物模型先端部の直立時からの水 平変位量を ζ ,水路床からの高さをHとする.植生直線部 の傾きを θ とする. θ =tan⁻¹(ζ/H)で近似する(図-9参 照).沈水植物模型のこれら傾倒量 ζ ,H, θ の U_{μ} に対す る変化特性を図 - 10に示す. U_{μ} =0~12cmの範囲では ζ ,Hが大きく変化し, U_{μ} =12cm/sでほぼ等しくなっている. このとき θ は約45°である. θ が45°を越えると U_{μ} に対する









図 - 15 沈水植物模型の θ, ζ, Ηの実験値と計算値の比較

 ζ , HOの変化量は徐々に小さくなっている.

(2) 沈水植物模型の抗力特性

流れに対して傾倒している沈水植物模型に作用する 流体力の全主流方向成分 F_x と全鉛直方向成分 F_z を,水路 床面に固定された2分力計を用いて計測した.これら測 定値を用いて,沈水植物模型の法線方向に作用する全 抗力 F_t (=($F_x^2+F_z^2$)^{1/2})を算定した. F_t , F_x , F_z の U_u に対



図 - 10 沈水植物模型のζ Η,θのU/に対する変化特性



図 - 12 沈水模型植物のCosと Reの 関係







図 - 16 沈水植物模型のF,, F, F,の実験値と計算値の比較

する変化特性を図 - 11に示す. U_m の増加に伴い, F_t , F_z は増加している.一方, F_x は U_m =8cm/sまでは急激に増加 しているが,その後の U_m の変化に対する増加は緩やかで あり一定値(約0.02N)に収束するようである.これは, 植生の傾倒量 ζ , θ の増加に起因している.

沈水植物模型の抗力係数Cccを(2)式を用いて算定した.

$$C_{DS} = 2F_x / (\rho A_s U_m^2)$$
 (2)

式中の A_s は,(1)式の場合と同様に静水時に直立している沈水植物模型の主流方向への投影面積である. U_n およびレイノルズ数 R_e (= U_nb/v ,b;葉幅,v;水の動粘性係数)に対する C_{28} の変化特性を図-12に示す.本植物模型がほぼ直立している U_n の小さい領域(U_n =約3.5cm/s, R_e =375)での C_{28} は,流れに対する本植生の傾倒が微小でありほぼ鉛直に立っているため(図-9参照),一様流中に置かれた細長平板の抗力係数の値¹⁵⁾(=約2)に近い C_{28} =1.8となっている. U_n の増加に伴い植生の傾倒が大きくなると, C_{28} は大きく減少している.

(3) 沈水植物模型の流れに対する傾倒量の評価

沈水植生模型に作用する抗力F_xの評価においては,植 生の傾倒量は重要な支配パラメーターである.沈水植 生模型の傾倒を評価するために,本植生模型に作用す る力の釣合いについて考察する.

沈水植生模型の変形形状は概ね直線であるので,図 -13に示すように植生軸を直線近似する.植生模型に 作用する外力は,重力,浮力,流体力である.流体力 は,植生模型表面に作用する壁面摩擦抗力は小さいの で,植生面の法線方向に作用する抗力のみとし,軸に 沿って等分布と近似する.この抗力の合成値を全抗力*F*_t とする.

植生の密度を ρ_{ρ} ,水の密度を ρ_{W} ,植生の体積をV(= 葉 長 / x 葉幅 b x 葉厚 t),重力加速度gとすると、モーメント釣合い式より(3)式が得られる(図-13参照).

$$W\sin\theta = F_t \tag{3}$$

式中の₩は模型植生の浮力であり(4)式で示される.

$$W = \left(\rho_{w} - \rho_{p}\right) Vg \tag{4}$$

植生面に対して垂直に作用する抗力 F_t は,植生の法線 方向への投影面積を $A(=A_s=葉長 / × 葉幅 b)$,流速の 植生の法線方向成分を $U_n \cos\theta$,抗力係数を C_o とすると (5)式で表される.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho_w C_D A (U_m \cos \theta)^2$$
(5)

(3),(4)式より

$$W\sin\theta = \frac{1}{2}\rho_w C_D A (U_m \cos\theta)^2$$
 (6)

(6)式を解くと

$$\sin\theta = \frac{-W + \sqrt{W^2 + (\rho_w C_D A U_m^2)^2}}{\rho_w C_D A U_m^2}$$
(7)

(4) 式で与えられる浮力Mは, 植生の傾きのには依存しない定数値である.従って,(7) 式において抗力係数C_のを与えれば植生の傾きのを得ることができる.

 $F_{t,t}$ U_{n} ならびに θ の実測値を(5)式に代入し本模型 植生の C_{0} を求めた . C_{0} の U_{n} に対する変化特性を図-14示 す . 本模型植生の C_{0} の U_{n} に対する変化は少なくその平均 値はC=1.7であった.

次に(7)式に $C_{0}=1.7$ を与えて算定した θ ,およびそ の θ を用いて傾倒量 ζ (=/sin θ)とH(=/cos θ)を算定し た.これら傾倒量の計算値と実験値の比較を図 - 15に 示す.計算値と実験値の θ は概ね一致している. ζ ,Hの 一致も良好である.従って,沈水植物のように曲げ剛 性E/が極めて小さい場合は, C_{0} を得ることができれば, 流速 U_{n} に対する植生の傾き θ を(7)式より評価できる.

さらに,(7)式に C_{F} 1.7を与えて算定した θ ,および その $\theta \geq C_{F}$ 1.7を(5)式に代入して抗力 F_i を求め, F_x お よび F_i を算定した.これら流体力の計算値と実験値との 比較を図 - 16に示す. U_m =0~15cm/sの範囲では, F_i の計 算値と実験値は概ね一致しているが, U_m =18cm/s以上で は計算値の F_i は実験値よりも小さくなっている.これは, 本モデル式においては,植生全長が直線的に変形する と仮定したため,河床付近における植生の緩やかな変 形による作用抗力の増加を考慮できないためである.

(4) 沈水植物模型群が有する抵抗則

群体植生間の流れは固有浸透場⁽⁶⁾であり、植生群上方 部の流れとの間に混合が生じている.従って、単体時 と群体時の植生に作用する抗力特性は、流速の水深方 向分が異なるために、多少異なっているが,群体時の 本沈水植物模型に作用する流体力の主流方向成分F_xを (2)式で定義されたC₆₀を用いて評価可能と仮定する.単 位面積あたりの本植生模型本数をaと仮定すると,本植 生模型群が有するマニンングの粗度係数nは(8)式で表 せる.式中のA₆は,静水時に直立している沈水植物模型 の主流方向への投影面積,hは水深である.

$$n = \sqrt{\frac{aC_{DS}A_{S}h^{\frac{1}{3}}}{2g}} \tag{8}$$

また一方,水没時の本植生模型群の抵抗則を透過係数 ¹⁷⁾ Kで評価すると, Klt(9)で表せる.

$$K = \sqrt{\frac{2gh}{aA_sC_{DS}}} \tag{9}$$

本沈水植物模型を水深 h=0.7mの場に,辺長 10cmの正 三角形で千鳥配置すると,単位面積あたりの植生本数 はa=132本/m²となる.静水時に直立している本沈水植 物模型1本の主流方向への投影面積はA_s=0.005m²(=葉長 /=0.5m×葉幅 b=0.01m)である.この場合の植生模型 群が有するマニングの粗度係数nを,(8)式を用いて算 定した結果を図-17に示す.U_mが小さい場合には,模型 植生の傾倒が小さいため図-17に示すようにC₀₀が大き くなる.その結果,粗度係数nは大きな値となっている. 一方,U_mが大きくなると模型植生の傾倒が増加するた めにC₀₀が減少する.その結果,粗度係数nは大きく減少 している.(9)式を用いて評価した本植生模型群の透過

係数は,U_が3.5cm/sから25cm/sが増加するに伴いCosが

減少する結果, 1=3.4m/sから1=10.2m/sへと増加する.

5.おわりに

河道内植生に作用する流体力の直接計測を試みた本 研究の主要な結果を要約すると以下のとおりである.

- 実ヨシを用いて,葉がある場合と無い場合のヨシ に作用する抗力及び流れに対する傾倒特性を把握し た.平均流速仏が小さい時は,流れ方向への葉の投影 面積が大きいため,葉がある場合の抗力は葉が無い 場合よりも極めて大きい.一方,平均流速仏が大きい 時は,流れ方向への葉の投影面積が減少するため, 葉がある状態と葉が無い状態の抗力の差は小さい.
- 2) 葉が無い実ヨシの茎において渦励振動が生じる場合には,流体力が増加することを確認した.この増加現象は,葉を有する実ヨシの茎では見られない.これは,葉の存在により実ヨシの水中での減衰定数が増加し,ヨシ茎の渦励振動量が抑制された結果である.
- 3) 極めて剛性が小さい沈水植物模型の変位と流体力 特性を調べた.流れに対して傾倒する本植物模型の 法線方向に作用する流体力の抗力係数Cold,植生の傾 倒量にかかわらずほぼ一定値(Co=1.7)であった.
- 4) 沈水植物模型の傾倒量を作用流体力より評価できるモデル式を提案した.
- 5) 沈水植物模型群が有するマニングの粗度係数/は, U^{*}が小さい場合には模型植生の傾倒が小さいためC^{*}が 大きくなる結果,大きな値となっている.一方,U^{*}が 大きくなると模型植生の傾倒が増加するため,本植 生模型に作用する流れ方向の流体力の抗力係数C^{*}が 減少する結果,粗度係数/は大きく減少している.
- 6) 植生に作用する流体力の直接計測より,流速の増加に伴い植生群部の粗度係数nが減少する機構を明らかにした.植生の傾倒や揺動特性を適切に評価すれば洪水時における植生部の抵抗則を精度良く評価できる.

謝 辞:本研究は,九州大学応用力学研究所平成16年 度共同研究と日本大学工学部文部科学省学術フロン ティア事業の援助を受けた.ここに記して深く謝意を 表します.

参考文献

- 水理講演会10年の歩みとこれからの基礎水理学の展開, 土木学会水理委員会基礎水理部会,1993.3.
- (財)リバ-フロント整備センタ-編:河川における樹木 管理の手引き,山海堂,1999.
- 中川博次・辻本哲郎・北村忠紀・藤井康嗣:流れによって変形する植生粗度の抵抗則,水工学論文集,第39巻, pp.465-470,1995.
- 4) 服部 敦:流れによる変形を考慮した高茎草本植物の抵



図 - 17 沈水模型植物群のマニングの粗度係数nの U_nに対する変化特性

抗則,土木学会論文報告集,No.782/ -70,pp.65-80, 2005.

- 伊東玲奈・新井宗之:河道内樹木の流水抵抗への影響に
 関する基礎的調査研究,土木学会第59回年次学術講演会
 講演概要集,2004.
- 6) 林建二郎,藤井優宏,重村利幸:開水路中における円 柱群に作用する流体力に関する実験,水工学論文集 第45巻,pp.475-480,2001.
- 7) 本溜博理,福井吉孝:樹木群に作用する流体力に関する研究,土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 pp.258-259,2001.
- 8) 橋本晴行:樹林帯を利用した土砂災害対策工の開発, H10~11 年度科学研究報告書(基盤研究 B1), 2006.
- 9) 林建二郎・辰野正和・長林久夫・橋本晴行:単独樹木 に作用する風力計測,流体力の評価とその応用に関す る研究論文集,第2巻,pp.96-103,2003.
- 10) 長林久夫,辰野正和,林建二郎,橋本晴行:風応力下に おける樹木の抗力特性に関する検討,流体力の評価とそ の応用に関する研究論文集,第2巻,pp.91-95,2002.
- 11)林建二郎・辰野正和・長林久夫・橋本晴行:単独樹木 に作用する風力と流れ,日本流体力学講演概要集, 2006.
- 油川曜佑・渡邊康玄・阿部修也:沙流川2003年8月洪水に おける樹木の倒伏状況から算定される流速,水工学論文 集,第49巻, pp.583-588, 2005.
- 13) 林建二郎・田中克也・藤間功司・重村利幸:一方向流中 で渦励振動している円柱に作用する流体力の増加特性, 水工学論文集,第43巻,pp.797-802,1999.
- 14) 中矢哲郎・池田俊介・戸田祐嗣・古賀智之:極めて柔軟 な沈水植生層内外の流れと植生の運動に関する研究,水 工学論文集,第48巻, pp.1627-1632,2004.
- 15) 日本流体力学会編:流体力学ハンドブック,丸善,1990.
- 16) 清水美彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀:直立性植生 層を伴う流場の構造に関する実験的研究,土木学会論文 集,No.438/ -17,pp.31-40,1991.
- 福岡捷二・藤田光一:洪水流に及ぼす河道樹木群の水理 的影響、土木研究所報告、第180号、pp.129-192、1990.