

水草を有する流れの抵抗特性

Resistance Characteristics of Flow with Water Plants

大阪大学工学部 正員 室田 明
 福井大学工学部 正員 ○福原 輝幸
 (株)フジタ工業 正員 村越 一也

1. 結論

水草を一種の粗度要素としてみた場合、その抵抗特性がいかなる物理量によって支配されるかは興味のある問題である。従来より植生のある流れを対象とした研究は、流出解析における正確な抵抗係数を算出することを目的として薄層流に対して数多くなされている。^{1)~3)}あるいはまた、比較的背が高く剛性のある植物が水路に繁茂した状態を対象とし、そこにおける抵抗則を調べた研究も見られる。^{4)~6)}ところが、水草のような柔軟性に富んだ植物に関する研究は少なく、むしろ流れの構造を議論したものが多い。^{7)~8)}

そこで、本論文では水草を有する流れの基本的な抵抗特性を示すとともに、動力学的考察も含めて水草の揺動が抵抗に関与する機構を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

水草を有する流れの模型実験に際して重要なことは、どのような水草を対象とするのか、そしてその水草の特性を表わすような粗度要素として何を選ぶかである。

本研究で対象とした植物は剛性がある茎部と、流れのままに漂うような極めて柔軟性のある葉部とから成る藻の類である。実際には茎部の曲がりの程度は流れの状態により変化するが、ここでは抵抗に及ぼす揺動の効果および葉部と茎部の抵抗を定量的に評価するという観点から、図-1のように茎部と葉部をピアノ線(直径0.1mm)で区別した。予備実験を重ねた後、粗度要素として厚さ0.03mmのポリエチレンを採用した。実験には幅0.5m、長さ20m、高さ0.32mの亚克力樹脂製可変勾配水路を使用した。十分な等流区間をつくるために粗度区間は水路上流端より5m下流の地点からの7m区間とし、横断方向には1cm間隔で粗度を設置した。粗度要素は幅2cmに統一し、茎部の長さを5cm、葉部の長さを12.5cmとした。特に、今回は以前に行った実験⁹⁾よりも粗度高さ k と水深 h の比 h/k の小さな範囲を対象としているために、粗度高さ k を3cmとした。上述したように茎部と葉部の抵抗特性をそれぞれ調べるための方法として、本研究では葉部だけがある場合と葉部と茎部から成る場合の2種類の実験を行なった。さらに、同一流量、同一勾配のもとで図-2のように、葉部の両端をピアノ線で固定したfixedタイプと、一端(下流側)を解放したwavingタイプの実験との比較から揺動の抵抗への関与の仕方を調べた。

流速測定にはプロペラ流速計と2成分熱膜流速計を使用し、測定場所は粗度要素と粗度要素の流下方向間隔の中央部とした。

なお、実験は $h \leq 6$ cm, 流量 $Q \leq 15$ l/secの範囲内で行われた。

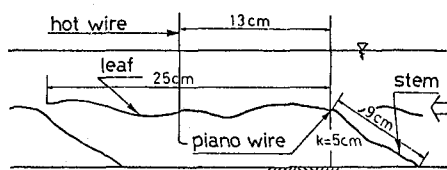


図-1 模擬植物の設置状態

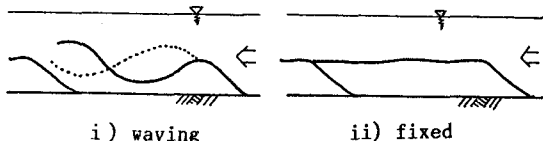


図-2 wavingとfixedの模式図

3. 抵抗特性

3.1 抵抗係数に及ぼすレイノルズ数および揺動の影響

図-3に路床勾配 $S=1.0 \times 10^{-3}$ における抵抗係数 $f (=8(u_* / U_m)^2)$ (u_* : 摩擦速度、 U_m : 断面平均流速)とレイノルズ数 Re の関係を示す。同図より次の事が指摘される。(1) waving, fixedとも限界レイノルズ数 Re_c は3000 ~ 4000の範囲にある。(2) $Re > Re_c$ (乱流域)では, waving, fixedとも直線の傾きは同じであるが、滑面乱流で得られるBlasius 式の勾配(-0.25)よりも急となる。

すなわち、

$$f = K_2 / Re^{0.68} \quad (1)$$

ここに、wavingでは $K_2=256$, fixedでは $K_2=178$ 。(3) $Re < Re_c$ (層流域)では、次式が成立する。

$$f = K_1 / Re \quad (2)$$

ここに、wavingでは $K_1=4200$, fixedでは $K_1=2700$ 。

以上より、揺動は抵抗の増大をもたらすことがわかる。本実験では、揺動により層流域では約1.6倍、乱流域では約1.4倍の f の増大が生じる。

図-4は f の代わりにマンニングの粗度係数 n で整理したものである。同図より次の事がわかる。(1) 図-3の限界レイノルズ数に対応する Re を境として直線の勾配が変化する。(2) 乱流域、層流域とも図-3に比べて勾配が緩やかになっており、 n の方が f よりも抵抗の変化が鈍化する。(3) 揺動に伴って n は層流域で約1.3倍、乱流域で約1.2倍ほど増大する。

最後に、従来からの抵抗表現である n と $U_m \times R$ (R : 径深)との関係を調べてみた。その結果が図-5であり、同図には著者らによるヨシを模擬した結果⁵⁾とKouwenらの結果⁴⁾も併示してある。 n は $U_m \times R$ の増加とともに減少し、顕著な勾配の変化は認められない。

3.2 抵抗係数に及ぼす路床勾配の影響

従来より芝上の薄層流では f は路床勾配 S の関数であり、 $f = a S^b$ なる結果が得られている。¹⁾ここに、 a は粗度高さに依存し、 b は降雨強度に依存する定数である。

そこで本実験でも $S=1.0 \times 10^{-3}, 3.0 \times 10^{-3}, 6.0 \times 10^{-3}$ の3種類の勾配のもとに、 f と Re の関係を調べてみた。その結果が図-6であり、路床勾配による f の差異は生じない。

3.3 葉の摩擦抵抗の評価

基部を取り除いた状態で葉の抵抗特性を調べてみた。その結果が図-7であり、 $Re < 3000$ では水深 h が粗度高さ k 以下となるので、 Re として3000以上の結果のみを示す。同図より次の事が指摘される。(1) $Re > 5000$ では f はwaving, fixedともBlasius の式と同一勾配をとる。すなわち、

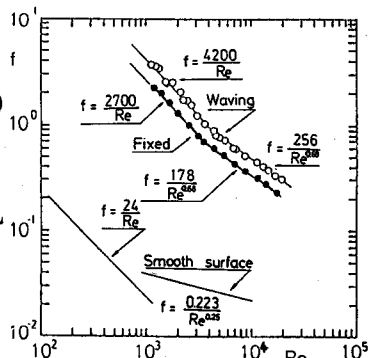


図-3 f と Re の関係

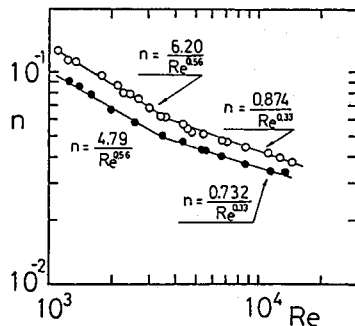


図-4 n と Re の関係

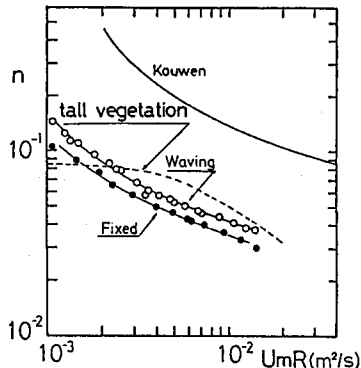


図-5 n と $U_m \times R$ の関係

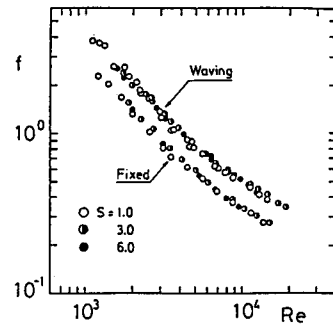


図-6 f と Re の関係

$$f = K / Re^{0.25}$$

(3)

wavingでの k を k_w , fixedでの k を k_f とおけば、 $K_w = 1.25$, $K_f = 1.09$ となる。なお以下ではwavingに関する添字として w を、fixedに関する添字として f を用いる。(2) 葉部だけでも揺動に伴う f の増大は1.14倍となる。これは図-8に示すように揺動に伴う乱れエネルギーの増大に起因する。(3) $Re < 5000$ になると Re の減少とともに f は小さくなる。(3)の原因として次の事が考えられる。実験時の観察では $Re < 5000$ になると葉の一部が水面に浮き出すようになり、さらに Re の減少とともに全部の葉が水面に浮くようになる。すなわち葉の摩擦抵抗は片面でしか作用しなくなる。そのために Re の減少とともに抵抗係数 f が減少すると思われる。

次に、全抵抗に占める壁面せん断力 τ_w と葉の摩擦抵抗 τ_e の割合を図-9に示す。ただし、 τ_w は滑面乱流のBlasius式に従うとして算定した。 $Re > 5000$ になると τ_w と τ_e の比はほぼ一定(1:4)となるが、 $Re < 5000$ では Re の減少とともに τ_w と τ_e の比は等しくなる。上述したように Re が最小(3000)な状態になると、流れは一種のダクト流れに近いことから推察しても、 $\tau_w \approx \tau_e$ は妥当な結果といえる。

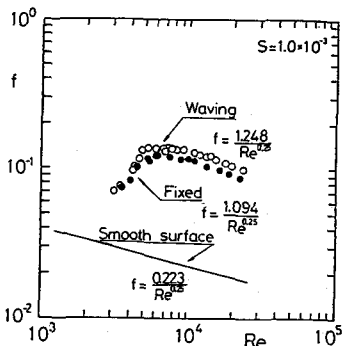


図-7 葉の抵抗と Re の関係

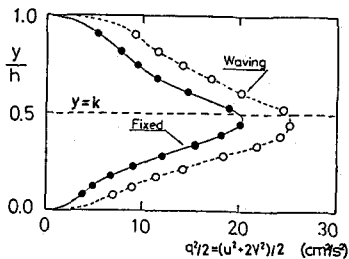


図-8 乱れエネルギー分布

表-1 揺動による水深と流速の変化

4. 平均流エネルギー収支にもとづく抵抗則の考察

水草の揺動は水深(特に上流側)を上昇させ、エネルギー勾配 Se の増大をもたらす、逆に表面流速の減少を招くことが表-1より理解できる。従って、ここではまずwavingとfixedにおける平均流エネルギー収支の違いを検討し、流れの内部構造より、揺動に伴う抵抗増大の機構の把握に努める。

水草を有する流れ場の平均流エネルギー方程式は次式となる。

		hup(cm)	hdown(cm)	U_s (cm/s)
Case-2	fixed	9.75	9.66	32.80
	waving	10.12	9.74	28.16
Case-3	fixed	9.40	9.69	18.16
	waving	9.53	9.69	14.93
Case-4	fixed	9.90	9.73	38.90
	waving	10.55	9.93	36.30
Case-5	fixed	9.43	9.72	16.91
	waving	9.55	9.72	15.74

hup: water depth at up stream side
hdown: water depth at down stream side
 U_s : surface velocity

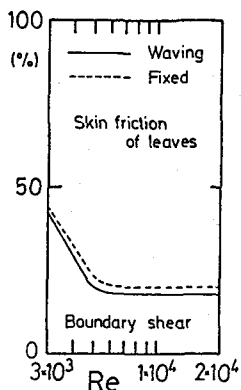
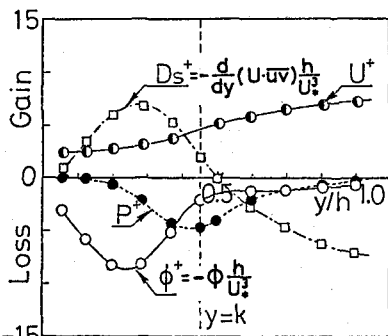
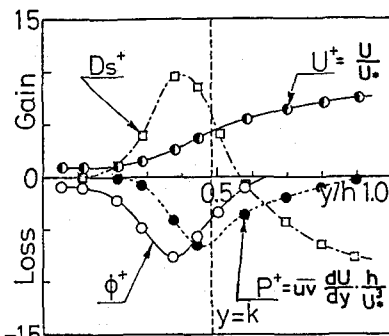


図-9 葉と壁面との抵抗比



(a) waving



(b) fixed

図-10 平均流エネルギー収支

$$gSeU + \bar{u}\bar{v} \frac{dU}{dy} + \frac{d}{dy}(-\bar{u}\bar{v}U) + \frac{\nu}{2} \frac{d^2U^2}{dy^2} - \nu \left(\frac{dU}{dy}\right)^2 - \Phi = 0 \quad (4)$$

ここに、 Φ は水草に起因するエネルギー損失を表わす。waving とfixedにおける結果の1例を図-10に示す。ただし、粘性拡散項、直接逸散項は他の項に比べて十分無視できるので図中には記載されていない。同図より次の事が知れる。(1) $y < k$ において、 $\Phi^+ (= \Phi h/u_*^3)$ はwaving, fixedとも $y \approx k/2$ で最大となる。最大値 $\Phi^+_{\max}$ はfixedでは乱れエネルギー生成率 $P^+ (= -\bar{u}\bar{v}dU/dy(h/u_*^3))$ の最大値 $P^+_{\max}$ と同程度であるのに対して、wavingでは $\Phi^+_{\max} \approx 2P^+_{\max}$ となり、 Φ^+ が卓越してくる。(2) P^+ はwaving, fixedとも $y \approx k$ で最大となる。(3) 揺動状態にあつては $y > k$ において、もはや Φ^+ は無視できなくなる。また、 $y \geq k$ における Φ^+ の大きさの比較から、水草によるエネルギー損失としては葉の摩擦損失よりも、茎の抗力による損失の方が大きいと推察される。エネルギー方程式を全水深にわたり積分し、整理すると

$$\int_1^0 (P + E + \Phi) \frac{h}{u_*} dy + \frac{U_m}{u_*} = \sqrt{8/f} \quad (5)$$

となり、抵抗係数とエネルギー損失との関係が導びかれる。ここに、 $y^+ = y/h$, $P = -\bar{u}\bar{v}dU/dy$, $E = \nu (dU/dy)^2$ 。本論文では揺動に伴うエネルギー増加の仕方を知るために、無次元化せずに、式(5)を積分した生の値をもって議論を進める。

waving(添字1)とfixed(添字0)における各項の値を表-2、表-3に示す。同表より、次の事が知れる。(1) 水草の揺動に伴うPの増加率は約15%であるのに対して、 Φ は約2倍となる。(2) 全損失エネルギー $T (= P + \Phi)$ は揺動に伴って50%増大する。(3) fixedではTに対するPおよび Φ による貢献はほぼ同程度となるのに対して、揺動が生じると $P : \Phi \approx 2 : 3$ になる。

以上より、揺動に伴う抵抗増大の主要因は乱れエネルギー生成率の増大よりも、むしろ水草の形状抵抗および摩擦抵抗に起因するエネルギー損失の著しい増大によるものと言える。

5. 揺動に伴う抵抗増加のメカニズム

4. に引き続き、ここでは揺動に伴っていかなる機構で抵抗が増加するかを検討する。

x方向の力の釣り合い式は次式で与えられるものとする。

$$\frac{f}{8} \rho U_m^2 A = \tau_w A + N C_d \frac{\rho U_m^2}{2} A_d + N C_f \frac{\rho U_k^2}{2} (2Ae) \quad (6)$$

表-2 平均流エネルギー方程式中の各項の値 unit (cm³/sec³)

	P_0	P_1	$\bar{\Phi}_0$	$\bar{\Phi}_1$	$P_0 + \bar{\Phi}_0$	$P_1 + \bar{\Phi}_1$	$g S_{e0} U_m h_0$	$g S_{e1} U_m h_1$
CASE-2	99	10	116	217	225	316	205	307
CASE-3	15	18	15	30	31	47	31	52
CASE-4	158	179	136	307	294	487	271	457
CASE-5	20	24	15	29	35	53	35	54

表-3 wavingとfixedにおける平均流エネルギー方程式中の各項の比

	P_1/P_0	$\bar{\Phi}_1/\bar{\Phi}_0$	T_1/T_0	P_0/T_0	$\bar{\Phi}_0/T_0$	P_1/T_1	$\bar{\Phi}_1/T_1$	$\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_0$
CASE-2	1.10	1.87	1.41	0.44	0.56	0.35	0.65	100.93
CASE-3	1.17	1.92	1.55	0.50	0.50	0.39	0.61	14.13
CASE-4	1.14	2.26	1.65	0.54	0.46	0.37	0.63	171.12
CASE-5	1.17	1.95	1.50	0.57	0.43	0.44	0.56	14.33

ここに、左辺は全抵抗の項を、右辺第1項は壁面せん断力の項、第2項は茎による抗力の項、第3項は葉による摩擦抵抗力の項をそれぞれ示す。また、 N は水草の総数、 C_d は抗力係数、 C_f は摩擦係数、 U_{mi} は $y < k$ (内部領域)での平均流速、 U_k は $y = k$ での平均流速、 A_d は茎1本当たりの流水断面への投影面積、 A_e は葉1枚当たりの片面の表面積をそれぞれ表わす。計算では面積 A は広矩形断面($B/h \approx 10$)とみなし、近似的に水路床の面積とする。

5. 1 葉の摩擦係数の推定

本実験では、 $U_k \approx U_m$ と成ることより、 τ_w にBlasius型の式を適用すれば、

$$C_f = \frac{(f - f_b)}{8N} (A/A_e) \quad (7)$$

となる。ここに、 f_b はBlasiusの抵抗係数を表わす。

式(7)に式(3)を代入し、wavingとfixedに対する C_f 求めると、

$$C_{ff} = \frac{a_f}{Re^{0.25}}, \quad C_{fw} = \frac{a_w}{Re^{0.25}} \quad (8)-1, (8)-2$$

となる。ここに、 $a_f = 0.17$, $a_w = 0.2$ となり、揺動に伴って C_f は約18%増大する。

5. 2 茎の抗力係数

本実験の植生状態において壁面せん断力は全抵抗の約5~7%である(この値は水素気泡法により測定された粘性底層内の流速に線形流速分布を適用して得られた τ_w からも支持される。)ことから、式(6)は

$$\frac{f}{8} \rho U_m^2 A = N C_d \frac{\rho U_m^2}{2} A_d + N C_f \frac{\rho U_k^2}{2} (2 A_e) \quad (9)$$

と近似的に表せる。

ここでは、fixedでの C_d 、すなわち C_{df} を求めるためにプロペラ流速計を用いて U_{mi} を求めた。

U_{mi}/U_m と h/k との間には図-11(a)に示すごとく、

$$U_{mi} = U_m (k/h) \quad (10)$$

のような関係が認められる。これより式(9)に式(8)-1, 式(10)を代入することで、次なる関係

$$C_{df} = a_d / Re_k \quad (a_d = 3900) \quad (11)$$

が導かれる。ここに $Re_k (= U_{mi} k/\nu)$ は内部領域の代表レイノルズ数を表す。

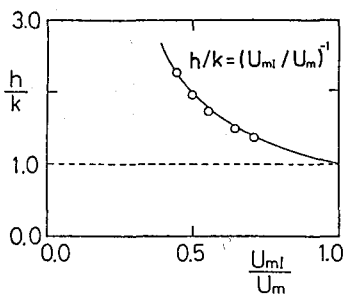
5. 3 wavingにおける f の推定

wavingにおいても U_{mi} と U_m との関係を調べると、図-11(b)に示すごとく次式を得る。

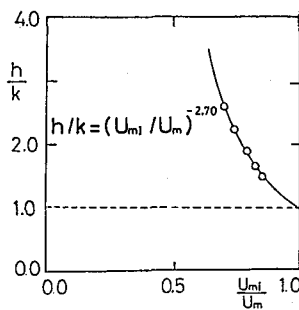
$$U_{mi} = U_m (h/k)^{-0.37} \quad (12)$$

ここで、wavingにおける f を推定する上での仮定を次のようにおく。(1) 葉の摩擦係数は茎がない場合のwavingにおける C_{fw} に等しい。(2) 茎の抗力係数は茎の幾何形状のみに支配されるものとして、 $C_{dw} = C_{df}$ が成立する。

以上の仮定のもとに式(9)に式(8)-2, 式(11)および式(12)を代入し、 f の計算値と実験値の比較を行った。その結果が図-12であり、計算値は実験値よりも若干大きくなるものの両値は良好に一致しており、同図から上述の仮定(1), (2)の妥当性が示唆される。



(a) waving



(b) fixed

図-11 h/k と U_{m1}/U_m の関係

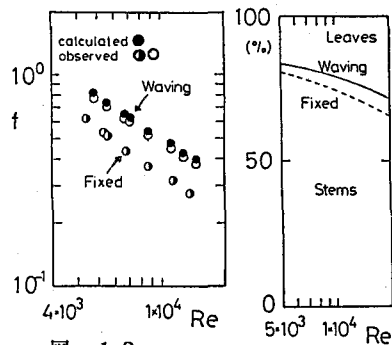


図-12

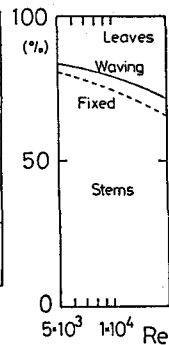


図-13

f と Re の関係 茎と葉の抵抗比

最後に、Re の変化による葉と茎との抵抗比を図-13に示す。揺動があることにより相対的に茎部からの全抵抗への貢献が増大している。また Re が小さくなるにつれ茎部による貢献が増大する。このことは Re の減少することにより流水断面積に占める茎部の遮蔽面積の割合が増大するためと考えられる。

以上より、揺動に伴う抵抗増加の主要機構は次のように考えられる。水草が揺動すると、その運動量輸送機能により、図-14で明らかなように流速分布の一様化が生じる。この一様化は内部領域における平均流速 U_{m1} の増大を意味するものであり、 U_{m1} の増大により坑力の増大、強いては抵抗の増大につながる。

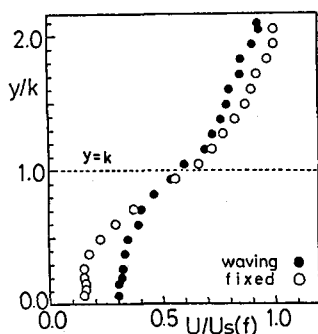


図-14 揺動による流速分布の変化

6. 結論

水草が揺動することにより、流れの抵抗は変化するものか、もし変化するならばどういった機構によるものかを明らかにするという目的で、藻を有する流れの模型実験を行ない、抵抗特性を調べた。

主要な結果は以下のとおりである。

(1) 水草の揺動に伴って流れの抵抗は増大する。

(2) (1) の主たる原因は、揺動に伴って内部領域の流速が増大するために、茎による形状抵抗が増大するためである。以上より、水草の運動量輸送機能は流れの抵抗と密接に関連していることがわかった。

最後に、本実験に協力して頂いた中堂 隆 君（当時、大阪大学4年生、現在、(株)奥村組）に謝意を表します。

参考文献

- 1) Chen, C.L. : A.S.C.E., Vol.102, HY3, 1976.
- 2) Ree, W.O. and V.J. Palmer : U.S. Soil Conservation Technical Bulletin, No. 967, 1949.
- 3) Phelps, H.O. : Water Resources Research, Vol.6, No.4, 1970.
- 4) Kouwen, N., T.E. Unny and H.M. Hill : A.S.C.E., Vol. 95, IR2, 1969
- 5) Kouwen, N. and T.E. Unny : A.S.C.E., Vol.99, HY5, 1973.
- 6) 室田 明、福原 輝幸 : 第38回年講概要集, 1983.
- 7) 日野 幹夫、歌原 英明 : 土木学会論文集, 第266号, 1977.
- 8) 室田 明、福原 輝幸 : 土木学会論文集, 第338号, 1983.