

樹木群の流水抵抗について

Fluid Drag of Luxuriant Vegetations on River Flow

建設省土木研究所 正員 福岡 捷二
建設省土木研究所 正員 藤田 光一
建設省土木研究所 正員 〇平林 桂
建設省土木研究所 正員 坂野 章

1. まえがき

高水敷および低水路河岸付近の樹木群は、洪水中、堤防への水衝りをおさえ、周辺の流速を減じるので、堤防および河岸の侵食を防ぐ効果をもつ。一方、樹木群の規模・密度・河道に占める繁茂面積の割合などによっては、洪水流の流下能力に影響を及ぼす場合がある。このため、河道計画において樹木群がもたらす効果と付加的な抵抗を評価することは重要である。そこで本論文においては、最初に単一樹木の抵抗特性を調べ、これを樹木群に拡張し、つぎに、模型樹木群の抵抗特性について考察する。

2. 単一樹木に働く抵抗

本実験では、単一樹木を流水中に設置し、これに働く抗力を測定する。ここでは、樹木の抵抗特性の把握を容易にするために、i) 自然の樹木、ii) 葉をすべて取り去った樹木、iii) 葉のみの抗力を測定し、それぞれの抗力特性を調べる。なお、樹木としては、形状が単純であり、かつ入手が容易な竹を用いた。

2-1. 実験装置及び測定方法

実験には、建設省土木研究所の長さ100m、幅6mの長方形断面を有する大型水路を用いた。水路中央には、図-1に示す抗力測定装置が設置されている。

測定項目は、抗力D、流量Q、水深hである。抗力の測定方法は、図-1に示すように、抗力測定装置に樹木を取り付け、これを流水中に浸し、抗力を直接バネばかりの指示値で読みとるものである。流量Q及び水深hは、それぞれ電磁流量計及び水位標より得た。

抗力係数 C_D は、次式により求めた。

$$C_D = \frac{D}{1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、D；抗力、 ρ ；水の密度、A；試料の投影面積、V；流速、である。なお、流速Vは次式により求めた。

$$V = \alpha \cdot Q / (B \cdot h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、B；水路幅(=6m)、 α ；装置に取り付けた試料を水中に没したとき、平均流速 $U(=Q/B \cdot h)$ を試料が位置するところの局所的な流速Vに換算するための補正係数(実験によりあらかじめ求めておく)である。

実験に先立ち、抗力測定装置の精度の検証を行った。滑面円柱の抗力係数は良く知られているので、検証方法は、本装置を用いて円柱の抗力を求め、前記(1)、(2)式に代入して抗力係数を求め、一般に広く知られる円柱の抗力係数と比較するものである。図-2は、検証結果を示したものである。図中の実線は、二次元円柱の $C_D \sim Re$ の関係である。実験値は有限の長さの円柱を用いているため、端部の影響で C_D がやや小さめとなっている。全体的にみて、抗力測定装置としての精度は十分といえよう。

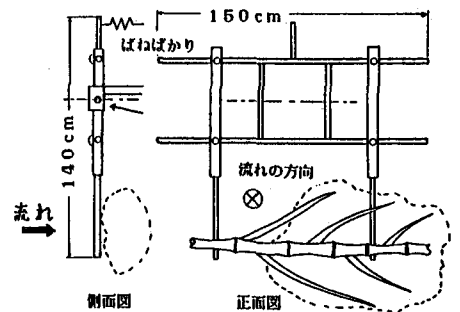


図-1 測定装置

2-2. 葉のついた樹木に働く抗力

実験に用いた樹木は8種類である。実験は、図-1のように樹木を測定装置にとりつけ、水深を約60cmに保ち、流量を変えることにより、0.3 m/s ~ 1.2 m/s の範囲の7種の流速を与え、それぞれについて抗力係数 C_D を求めた。実験後、樹木についている葉の枚数及び表面積、枝の長さ及び投影面積を測定した。ただし、ここで言う投影面積とは、枝ごとに長さと直径を乗じたものの総和で、厳密には、慣用的に用いる投影面積とは異なるが、その差異はわずかである。

得られた C_D と Re 数 ($= V \cdot d_m / \nu$, d_m : 枝の平均直径, ν : 動粘性係数) の関係を示したのが図-3である。図中の記号の違いは異なる樹木をあらわしている。図-3において、樹木一本に注目すると、 $4000 < Re < 10000$ の範囲で、 C_D はほとんど変化しない。しかし各樹木ごとの C_D の平均値 C_{Dm} は樹木ごとに異なる。この原因について検討する。図-4に示すように、樹木は幹である第一枝に対し、第二枝が放射状の構造をもつ、したがって、流水中では枝間の相互作用があらわれる。そこで、枝の密度 λ を図-4を用いて次のように定義する。

$$\lambda = \frac{\text{葉を無視した樹木の実質体積}}{\text{樹木による流れの影響体積}} = \frac{\bar{V}}{L \cdot h^2} \quad \dots (3)$$

ここに、 L : 樹木の高さ、 h : 水深 (≈ 60 cm) である。得られた λ と C_{Dm} との関係を示したのが図-5である。この図によれば、ばらつきはあるものの、 λ が増加するに従い C_{Dm} が減少する傾向がみられる。ばらつきの主要な原因は、樹木ごとの葉の枚数の違いにある。 λ が小さいとき、 C_{Dm} が相対的に大きいのは、個々の枝間の相互作用が小さく、枝の周辺の流速が、無限遠の流速とあまり変わらないためと考えられる。 λ が大きいとき、 C_{Dm} が小さいのは、枝間に相互作用が働き、ある枝は、それより上流部の枝の後流域に入ってしまうような現象が起きているためと考えられる。なお、整列した円柱の C_D と λ との関係については研究がいくつか行われており、相互作用が現れてくる λ は、本研究における λ より大きい¹⁾。樹木の場合は、個々の枝が整列しておらず、乱雑であり、また、第一枝と第二枝の結合部付近は枝の直径に比べて間隔がせまいので、整列した円柱の場合より小さな λ でも相互作用が働くものと考えられる。

2-3. 葉に働く抗力

次に、葉に働く抗力を調べる。実験は、図-6に示すように直径 0.7 mm のピアノ線に多数の葉を取り付ける。これを図-1の装置に 5 cm 間隔で 3 本取りつけ、流水中でその抗力を測定する。ピアノ線に葉を付ける際、図-6のように、葉の向きはす

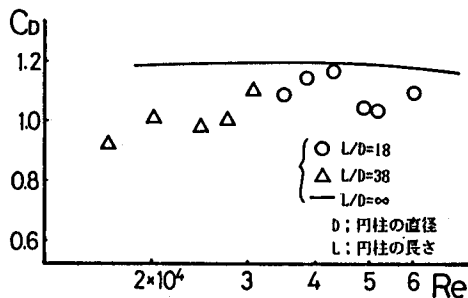


図-2 円柱の $C_D \sim Re$ 関係

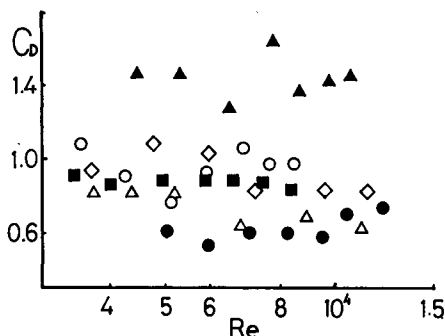


図-3 葉のついた樹木の C_D と Re の関係

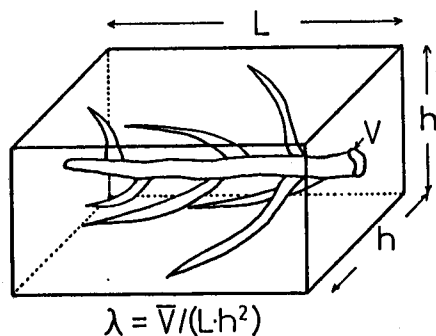


図-4 樹木の密生度 λ の定義

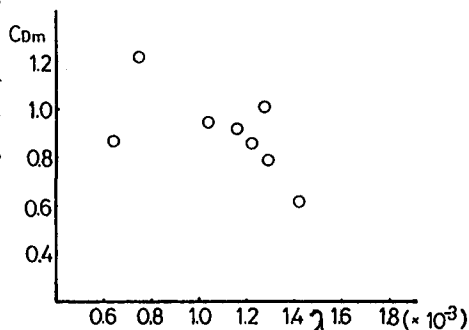


図-5 葉の付いた樹木の C_{Dm} と λ の関係

べて流下方向へ向けたが、これは、2-2. 葉の付いた樹木に働く抗力測定実験において、10 cm/s 程度の流れでも、葉はすべて流下方向になびいたのが確認されたためである。与える流速は、前の実験と同様、0.3 m/s ~ 1.2 m/s の範囲の7種である。ピアノ線に作用する抗力は円柱の $C_D \sim Re$ 数の関係より計算し、測定された抗力値からこの値を減じ葉に作用する抗力とした。

得られた抗力を次式に代入し、抵抗係数を求めた。

$$C_f = \frac{D}{1/2 \rho \cdot A \cdot V^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、A ; 表面積である。

葉群の C_f と Re ($= \frac{V \cdot L_f}{\nu}$, L_f ; 葉の平均長さ) の関係を示したのが図-7 である。図中の記号の違いは、ピアノ線に取り付けた葉の分布密度の違いをあらわしている。この図によれば、 C_f はおよそ $\sqrt{Re}$ に反比例していることがわかる。そこで、 $C_f = K/\sqrt{Re}$ と定義し、各葉群ごとに K の値を求めると、葉群の分布密度の違いにより、その値は異なる。いま、葉群の分布密度をあらわすパラメータとして、無次元量 $A_* = A_e / A_D$ を定義する。 A_e とは、ピアノ線に取り付けた葉群の総表面積であり、 A_D は、葉群が分布している平面の面積で図-6 に示すピアノ線の長さ L_p と葉の平均長さ L_f の積である。図-8 は、 K と A_* との関係を示したものである。これによれば、 A_* が増加するのに従い K は増加し、一旦ピーク値を取り、さらに A_* が増加すれば、 K は減少する。この理由は、 A_* が小さいときは、葉同志の距離が相対的に大きいときであり、個々の葉は互いに干渉を及ぼすこともなく、葉群全体に働く全抗力は、個々の葉に働く抗力の総和に近い値となっている。 A_* がやや大きいとき、葉間の距離は相対的に小さくなり、個々の葉間の相間干渉がきいてきて、個々の葉の表面抵抗のほか、葉群の間隙を通りぬけるような流れにより付加的な抵抗が働き、全抵抗を増すものと考えられる。 A_* が大きいときは、葉がかなり密集した場合であり、葉群全体があたかも一枚の平板のようになり、付加的な抵抗が減少し、このため全抵抗は減少したものともみられる。

2-4. 葉を取り去った樹木に働く抗力

ここでは、2-2. で用いた樹木より葉をすべて取り去り、これの抗力を調べた。実験は、葉の付いた樹木に働く抗力の測定と同様の手順で行った。得られたデータを(1), (2)式に代入し、 C_D を求めた。得られた C_D と Re 数の関係を示したのが図-9 である。図中の記号の違いは、実験に用いた樹木の違いをあらわしている。図-9 において樹木一本に注目すると、 Re 数の変化にかかわらず C_D はほぼ一定値をとる。樹木ごとの C_D の平均値 C_{Dm} と λ との関係を図-10 に示す。図-10 には葉が付いた場合の結果もプロットし、両者を比較した。この図から葉を取り去った樹木の C_{Dm} も葉がある場合と同様に、 λ の増加に伴い減少する傾向があることがわかる。

以上から、枝同志の相互作用を考える上で、密生度 λ が重要なパラメータであることが確認された。このことは、単一樹木が集合した樹木群の抵抗特性を考える上でも、 λ が支配パラメータの1つであることを示

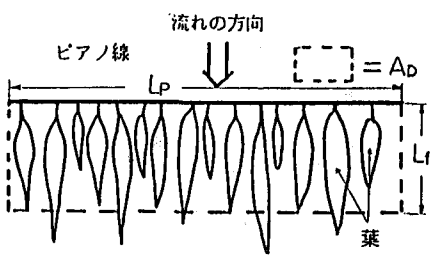


図-6 A*の定義

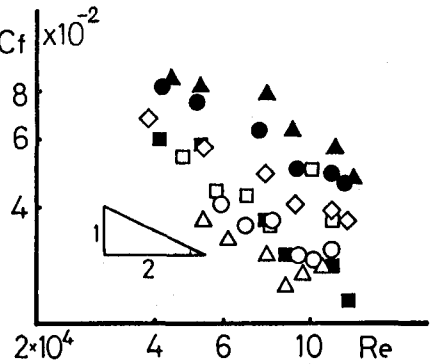


図-7 葉群の C_f と Re 数の関係

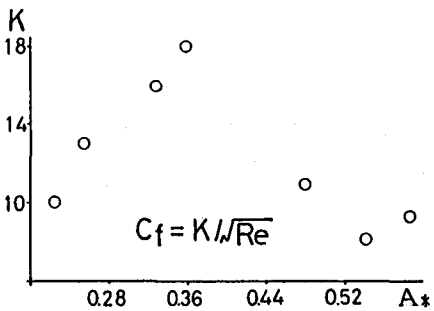


図-8 A_* と K の関係

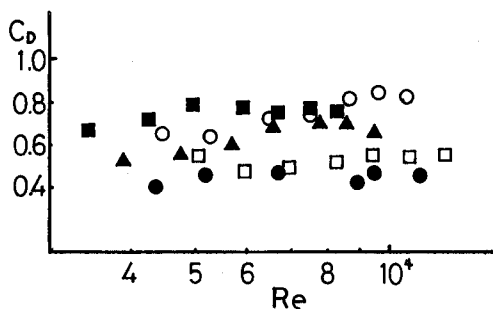


図-9 葉を取り去った樹木の C_D と Re の関係

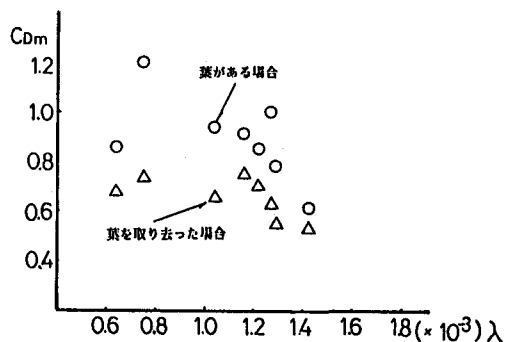


図-10 葉を取り去った樹木の密生度 λ と C_{Dm} の関係

している。

3. 模型樹木群の抵抗

3-1. 単一樹木実験との関係

ここでは、流水中に模型樹木群を置き、樹木群による流れの付加的な抵抗を調べるための考え方を述べる。この模型実験が実現現象を表すためには、模型樹木群の抵抗特性が、現実の樹木群の抵抗特性を近似している必要がある。この条件としては、模型と現地の樹木群の間に力学的な相似関係を満たすことが必要である。また樹木群の空隙率は非常に大きいので、樹木群内部には速度の遅い流体塊を多量に保持できるという特徴を有している。このように樹木群内におそい流れがある場合、樹木群外のはやい流れと干渉しあって付加的な抵抗が生じる。そこで、模型樹木群も、この付加的な抵抗を再現できるよう、空隙の多いものを用いる必要がある。樹木群の抵抗特性についての力学的相似条件については次のように考える。

樹木群の抗力と、control volume 内の水の重力、河床に働くせん断力のつり合いを考えると次式が成り立つ。

$$\rho \cdot g \cdot V_t \cdot I = \frac{1}{2} \cdot n \cdot a \cdot C_D(\lambda) \cdot \rho \cdot V^2 + V_t \cdot \rho \cdot g \cdot n_b^2 \cdot V^2 / h^{4/3} \quad (5)$$

ここに、 V_t : control volume 内の水の体積、 I : エネルギー勾配、 a : 樹木一本の投影面積、 n_b : 河床の粗度係数、 h : 水深、 n : 流体塊内にある樹木の本数、である。また C_D は抗力係数で、この値は2節の結果から密生度 λ の関数となる。(5)式は次のように変形される。

$$V = k \cdot I^{1/2} \quad (6) \quad \text{ここで、} k = \sqrt{\frac{g \cdot V_t}{1/2 \cdot n \cdot a \cdot C_D(\lambda) + V_t \cdot g \cdot n_b^2 / h^{4/3}}}$$

上式からわかるように、 k は樹木群の諸元、河床の状況から決まる。これを透過係数と呼ぶことにする。

模型実験はフルードの相似則に従うので、模型樹木群の透過係数 k_m を $k_m = k_p \cdot \sqrt{L_m / L_p}$ (L_m / L_p は縮尺を表す、 k_p : 現地の樹木群の透過係数)とすれば、現地と模型を相似にすることができる。現地の樹木群の透過係数 k_p を推定する方法は未知であるが、単一樹木と樹木群の抵抗特性が似ていると考え2節で述べた方法と同様に密生度 λ を用いることにより、 k の推定がある程度可能になるものと考えられる。

3-2. 樹木群実験

本実験は、水路の片側あるいは両側に模型樹木群を配置して、通水し、水位を測定することにより、樹木群がもたらす付加的な抵抗を測定するものであり、主に、模型樹木群の幅・配置と付加的な抵抗との関係を調べた。模型樹木群には、写真-1に示すプラスチックの糸がはちの巣状にからみ合ったものを用いた。この模型の密生度 λ_m は0.09であり、実在の樹木群に比べかなり大きい。また、模型樹木群の抵抗は実験により求められ、透過係数 k_m は0.45 (m/s)である。

実験では、巾2.0 m、長さ50 m、勾配1/1000の広長方形断面水路を用い、図-11に示すように種々の幅

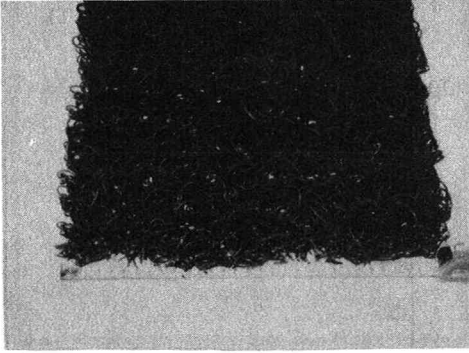


写真-1

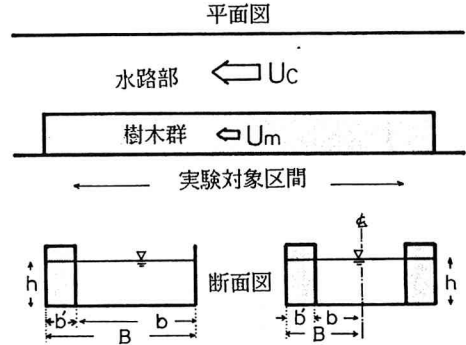


図-11 実験装置

を持つ模型樹木群を水路の片側もしくは両側に配置した。実験は、水路下流端の堰上げゲートを調節し、等流状態を得たうえで、水位・流量を測定し、流況を観察した。なお1つの樹木群形状について4～5種の流量を与えた。水位測定は、水路縦断方向に3mピッチで行った。

2-3. 実験結果及び解析

樹木群内の流速 U_m と樹木群外の流速 U_c には大きな差があり、このため樹木群外の流れには樹木群との境界に沿って規模の大きい平面渦が規則的に生じ、次々下流へ流下する。この渦の流下に伴って、樹木群から遅い流体が周期的に流速の大きい主流部に流出し、そこで急激に加速され激しく混合する。樹木群内外のこうした非常に周期的な混合現象は、樹木群の巾 b' が30cm以上になると顕著になる。

上記のように、樹木群内外では、大規模な平面渦の流下に伴い活発な運動量交換が存在するので、境界部では、通常の側壁に作用するせん断力では考慮できない付加的なせん断力 τ が作用している。そこで、この τ の大きさについて考察する。まず、複断面流れの場合と同様に⁴⁾⁵⁾、樹木群内と主流部におのおの独立に力のつり合い式を与える。すなわち、

$$\tau_c \cdot b + h \cdot \tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot b \cdot I \quad (\text{主流部}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_m \cdot b' - h \cdot \tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot b' \cdot I \quad (\text{樹木群内}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 τ_c ：主流部河床に働くせん断力(= $\rho \cdot g \cdot R_c \cdot I$, R_c ：主流部の径深), h ：水深, τ_m ：樹木群のある河床に働くせん断力(= $\rho \cdot g \cdot R_m \cdot I$, R_m ：樹木群の占める部分の径深), ρ ：水の密度, である。樹木群内の流水抵抗は、前述のように、 $U_m = 0.45 I^{1/2}$ [m/s] で表わされる。これを(8)式に、またマンニングの平均流速公式 $U_c = 1 / n_c \cdot R_c^{2/3} \cdot I^{1/2}$ を(7)式に代入し整理すれば次式を得る。

$$\frac{\rho \cdot g \cdot n_c^2 \cdot U_c^2 \cdot b}{R_c^{1/3}} + h \cdot \tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot b \cdot I \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\rho \cdot g \cdot R_m \cdot U_m^2 \cdot b'}{0.45^2} - h \cdot \tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot b' \cdot I \quad \dots\dots\dots (10)$$

得られた計算結果より、 τ と $(U_c - U_m)^2$ の関係を示したのが図-12である。この図から、流速差 $U_c - U_m$ の増大にともなって τ が増大すること、樹木の形状によって両者の関係が大きく異なることがわかる。 b' の小さい場合(図中の○や●)には、 τ と $(U_c - U_m)^2$ が比例に近い関係にあるが、 b' の大きい場合(図中の□や△)には、両者は比例関係からはずれ、 τ の $(U_c - U_m)^2$ に対する増加率が、 $(U_c - U_m)^2$ の増加に伴い大きくなっている。このことは、次式により定義される混合係数 f ⁶⁾が必ずしも一定ではないことを表わしている。

$$\tau = \rho \cdot f \cdot (U_c - U_m)^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

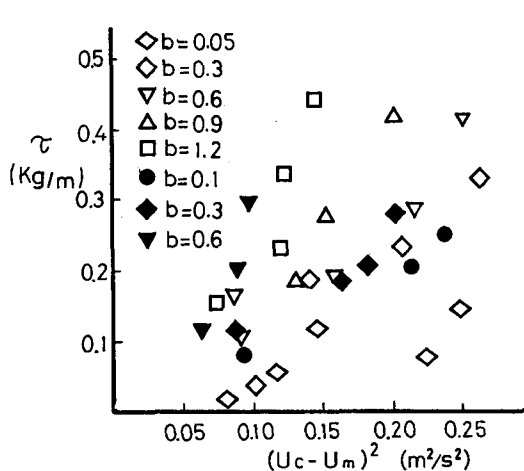


図-12 τ と $(U_c - U_m)^2$ の関係

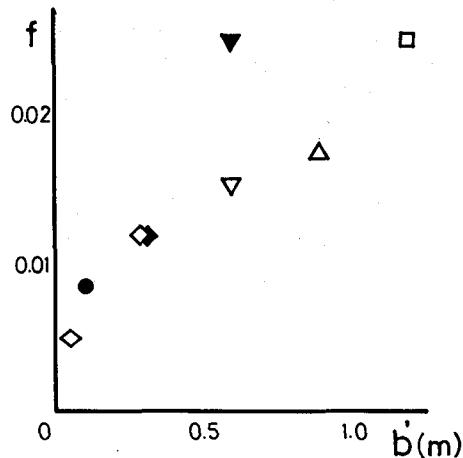


図-13 各樹木群形状の平均 f と b' の関係

f は、流速差 $(U_c - U_m)$ に対する樹木群内外の流体の交換速度の比と考えることができる。したがって樹木群形状が同じ場合でも f が変化するの、樹木群内外の流体の混合形態が、流速差 $U_c - U_m$ の増大、あるいはこれに伴う水深の増大により変化するためであると考えられる。

次に、混合の強度に与える樹木群形状の影響について考察する。図-12からわかるように、本実験の範囲内では、同一樹木群形状における f の変化よりも、樹木群形状による f の違いの方が大きい。そこで、上述のような問題はあつたものの、各樹木群形状についての実験結果から得られた平均の f 値を用いて、樹木群形状の影響を調べる。図-13に、各樹木群形状の平均 f と b' との関係を示す。この図から、 f は 10^{-2} のオーダーであり、複断面河道の場合⁵⁾に比較して1オーダー程度小さいことがわかる。また f が b' の増加に伴い大きくなっている。これは、 b' が小さい場合、樹木群内の流れが側壁からの拘束を受け樹木群外との流体の交換が起こりにくいのに対して、 b' が大きくなると、こうした拘束が小さくなり、交換が容易に行われるためであると考えられる。流況観察において、 b' が0.3 m以上になると前述の大規模な平面渦が認められるようになることも、このことを裏付けている。こうした側壁の存在による樹木群内外の拘束を支配するパラメータは、より一般的に考えるならば、 b'/L_E (L_E : となり合う大規模な平面渦の間隔) であると推定される。ところで、図-13から、 b' が1 mを越えると f が急に増大し、また b' が0.6 mの場合でも、樹木群が両側に配置されるとやはり f が大きくなるのがわかる。このことは、すべての場合に f が b' だけによって支配されるのではないことを示している。これは、以下の理由によると考えられる。 b' が1 m以上になるか、 b' がそれ以下でも樹木群が両側に配置されると、樹木群がない部分の巾が小さくなり、樹木群内からの遅い流体の流出の影響が樹木群がない部分全体に及ぶようになり、このことが、樹木群内外の干渉効果を増幅させる作用を持つ。

以上により、樹木群による流れの付加的な抵抗の特性と、それに及ぼす樹木群形状の影響が明らかとなった。本研究の結果をもとに、 f に代表される混合の程度を支配するより一般的なパラメータを見出し、それに与える樹木群形状の定量的な影響をより一般的に明らかにすることが今後の課題である。

<参考文献>

- 1) Blevins: Applied Fluid Dynamics Handbook
- 2) 平野・水原・大手: 植生水路を対象とした抵抗則に関する研究, 新砂防, Vol.36: No. 4.
- 3) Li・Shen: Effect of Tall Vegetations on Flow and Sediment, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.109, No. HY5, 1973.
- 4) Knight・Demetriou: Flood Plain and Main Channel Flow Interaction, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.109, No. 8, 1983.
- 5) 福岡・浅野・藤田・坂野: 複断面河道における洪水流の抵抗特性, 第30回水講, 1986.
- 6) 山崎・石川・金丸: 開水路平面せん断流に関する実験的研究, 第39回水講, II - 237, 1984.