河道樹木群による水流エネルギー減衰に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON FLUID ENERGY REDUCTION INDUCED BY TREE MEMBERS IN RIVER BASIN

山上路生¹・岡本隆明²・瀬津家久³

Michio SANJOU, Takaaki OKAMOTO and Iehisa NEZU

¹正会員 博(工) 京都大学准教授 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)

²正会員 博(工) 京都大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 京都大学名誉教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

A flood protection forest is highlighted as one of conventional river-management methods, which fits reasonably into natural environment. This study focuses on one-line tree models laterally placed in open-channel flows, and we conducted horizontal PIV and drag force measurements to examine a reduction efficiency of a mean kinetic energy due to the tree members. A flow structure is closely related to a wake phenomena for sparse alignment of the trees, and in contrast, it is similar to a jet for dense one. It was found that the drag force is formed being relevant to the separation zone behind the trees, and a semi-theoretical formula which can predict reasonably the energy reduction efficiency was developed in the present paper.

Key Words : flood protection forest, energy reduction of mean stream, open-channel flow and horizontal PIV measurements

1. はじめに

津波、高潮および洪水被害を抑制するために強固な堤防の建設が進められている一方で、水害防備林や防潮林のような自然樹木を利用した防御法は、景観的にも有用である。これらは伝統的な河川管理技術の一種で、環境面への影響が少ない¹⁾。これらの防備林の設置で重要なことは、十分な強度をもつ支持基盤、激しい水圧に耐えうる根幹および適切な配置パターン等の選定を十分に検討することである。本研究では水理工学の観点から、特に樹木の配置間隔と流体力の関係を後流剥離層の形成特性から考察するとともに、効率的なエネルギー減衰を実現するための樹木配列に関する基礎データの解析とその考察を行う。

これまでも樹木と流体力の関係については河川植生の研究を中心に多くの研究グループによって鋭意解明されてきた。たとえば、福岡ら²⁾は室内水路に設置した樹木模型の抗力を計測した。彼らの模型には枝葉が付いており、これらの有無が抗力係数に及ぼす影響を調べて樹木の形状が抗力特性を決定する重要な一因であるとしている。林ら³⁾は大型風洞と室内水路を用いて接近流速（この場合、樹木から十分上流における断面平均流速）と抗力の関係、流速による樹木の投影面積の変化、樹幹内の

流れ特性などを詳細に調べた。藤森ら⁴⁾は自動車による曳行試験によってツルヨシに作用する流体力を計測し、たわみを考慮した解析結果を報告している。Nepfグループ⁵⁾⁶⁾も非水没植生に作用する流体力や、植生群から形成されるパッチ背後の流速場の特性とパッチ内の植生密度との関係に注目し、特に後流域のせん断層の発達特性を解明した。これらは流体力の発生に大きく寄与するものといえる。Tanaka & Yagisawa⁷⁾は水没および非水没の双方の条件における円柱群パッチ周辺の流れ場と抗力の計測を行い、相対水深、円柱間距離、パッチを構成する円柱数と抗力係数の関係を整理した。またパッチ背後には個々の構成円柱から放出される小規模のカルマン渦列と、パッチ外淵より生成される大規模のカルマン渦列が存在することを示した。Nikoraら⁸⁾は野外計測を行い、実河川における水没状態の植生パッチによる流水抵抗を評価している。Naoarayanan et al.⁹⁾は非水没植生を模した円柱群を通過する流れにおいて、エネルギーの損失特性や粗度係数を実験的に評価している。

植生と流れの干渉問題は水理分野だけでなく、気象学や風工学の分野でも関心が高く、空気流を対象にした樹木の倒伏や抵抗特性に注目した研究も数多く存在する。石川¹⁰⁾は暴風による実際の樹木倒伏の事例を挙げながら樹木周辺の流速場の特性を詳しく説明している。

このように樹木と流れの関係性については多くの貴重な知見が得られているが、水害防備林が有するエネルギーの減衰効果についての定量的な知見は不十分である。水流は樹木などの構造物を過ぎる際に抗力やせん断力に対する仕事によってエネルギーを失うが、それらは樹木背後に形成されるウェイク領域の特性に依存するところが多い。例えば、流れに垂直に並列した樹木の間隔が大きければ、単一円柱に近い後流の特性に類似する一方で、間隔が小さければスリットから流出するジェット流の特性に類似する。またこの間隔は混合層幅や剥離領域に大きな影響を与える。さらに流速の大小もこれらのウェイク特性を支配する。樹木にかかる抗力は剥離域の大きさと密接するから、樹木抗力の発生メカニズムを知るには1次元的な解析法だけでなく、2次および3次元的な乱流構造の解明が必要である。

本研究では循環開水路にスパン方向に樹木モデルを並列配置し、PIVによる水平面の瞬時流速場の計測とフォースゲージによる抗力計測を行った。特に研究の基礎ステージとして水面形の変化が小さい、低流速の条件を対象に実験を行い、配置間隔と本数が後流域の形成と樹木抗力の発生に及ぼす影響を調べた。さらにエネルギー減衰の効率性に関する実験式を構築した。

2. 実験方法

実験は京都大学桂キャンパスの乱流水理実験室に設置された可変勾配水路にて行った。幅は40cm、長さは10mで計測部は側面だけでなく底面も強化ガラスとなっており、下方からの観察が可能である。上流から7m地点にスパン方向に複数の樹木モデルを等間隔に並べた。図-1のように樹木モデルは外径26mmの亚克力円柱を用いた。本数を1, 3, 5本の3通り設定して等間隔になるように設置した。図中 B, D, H および b は水路幅、モデル外径、水深および隣接するモデルの中心間距離である。 x, y, z は主流、鉛直および横断方向座標で、原点位置はそれぞれ、円柱下流端、水路底面および水路センターラインである。 U, V, W はこれらの座標に対応する時間平均した流速成分である。

流速計測は水平面のPIVによって行った。図-1に示すように連続発光の2mm厚のレーザーライトシート(LLS)をガラス側壁の外側から照射した。樹木モデルの真横から照射するとモデルの裏側に影ができ可視化できない領域が発生する。今回はこれを防ぐために2つのLLSを使用し、モデル位置をはさむ上流および下流側から2つのLLSを水路側壁に対して45度の角度をつけて照射した。定規を複数使用してLLSが水平になるよう注意した。比重1.02、径100 μ mのトレーサー粒子を水流中に注入し、

表-1 実験条件

H (cm)	U_m (cm/s)	Fr	Re	n	b/D
15	15.0	0.124	3900	1	7.69
	15.0	0.124	3900	3	3.85
	15.0	0.124	3900	5	2.56
	10.0	0.082	2600	3	3.85
	20.0	0.165	5200		
	30.0	0.247	7800

図-1 実験装置と座標系

LLSによって可視化された粒子群を水路上方に固定した高速度カメラで連続撮影した。フレームレートは後述の水理条件によって100Hzから500Hzの幅で変化させたが、サンプルレートはパルスジェネレータを用いて全ケースともに30Hzとした。フレームレートは2枚の画像ペアの撮影間隔であり、サンプルレートは画像ペアの取得時間間隔である。校正画像より求めた撮影領域サイズは200mm×200mmで、相関窓サイズは9.9mm×9.9mmとした。またセンターに位置するモデルにフォースゲージ(日本電産シンゴ製)を接続して抗力を実測した。樹木模型とゲージの間に水流方向に沿ってアルミ棒を介し、模型に作用する力を直接的にゲージが感知するようにセットした。なお120s間の時間平均値を抗力値とした。

表-1に水理条件を示す。水深 H は15cmで全ケースで統一した。流量を円柱モデルの設置断面から1m上流面における流水断面積で除した平均主流速 U_m は表のとおりに変化させた。レイノルズ数は U_m と D より評価した。 $U_m=15$ cm/sのケースについては b/D を3通りに変化させた。また $n=3$ 本($b/D=3.85$)のケースを対象に U_m を4通りに変化させた。なお水深は樹木モデルの極近傍を除いてその流下方向変化はほとんどなかった。水路勾配 $\tan \theta$ は1/5000である。

3. 水理特性とエネルギー減衰効率の考察

(1) 時間平均流況の比較

図-2は $U_m=15$ cm/sについて樹木モデルの本数、すな

図-2 時間平均主流速のコンターと平均流速ベクトルの比較 ($U_m = 15 \text{ cm/s}$) ; コンターは流速ゼロ位置を示す.

図-3 時間平均主流速のコンターと平均流速ベクトルの比較 ($n/D = 3.85$) ; コンターは流速ゼロ位置を示す.

わち b/D を変えて比較した流速ベクトルと主流速のコンターである. $n=1$ ($b/D=7.69$) は単一円柱の流れであり, 典型的な後流現象がみられる. $n=5$ ($b/D=2.56$) は開口部が並列した2次元噴流に近い流れである. このように樹木本数によって流れが後流型から噴流型へと変化するが, いずれのケースについても樹木モデル通過直後には高速域と低速域が形成される. 特にモデル背後には逆流が支配的となる剥離域があり, これが円柱に作用する抗力を生み出す. 水面変動が無視できると仮定すれば, 樹木モデルの本数が多いほどモデル設置断面における通水面積は減少するから, 連続式より高速域の速度は増加する. このため逆流域が主流方向に長い. この特性は後述する樹木抗力に大きな影響を与える.

一方, 図-3は $n=3$ ($b/D=3.85$) について U_m を変えて

比較したものである. U_m による流れ構造の大きな差異は認められない. 高速域については円柱近傍で局所的に大きくなるが, これは円柱前面で回避した流れの運動量が集中するためである. 円柱の背後では高速域と低速域の流速差は大きく混合が十分でないため, 主流速は横断方向に不連続な分布をもつが, 流下とともに高速域と低速域の混合が進み, 滑らかな分布形へと変化する. このように樹木群背後には流体運動の複雑な素過程が存在しており, まずはそれらを十分に理解することが必要である.

単一孔の噴流の発達領域で噴流幅が線形的に増加するが, 本研究で扱う並列スリットの流れ場では, 隣あう噴流がある距離で干渉 (ミート) する. したがって流れの構造がやや複雑になる. これを整理するために図-4に樹木背後の領域を流下方向に沿って分類する. まず樹木

図-4 樹木スリット周辺の領域区分

の存在が上流側の流れに影響を与える領域を(i)upstream zoneとする。これは樹木下流端を下流側の境界位置とする。上流側は仮想原点を取りこれを境界位置とする。この仮想原点(imaginary origin)については後述する。次に樹木の背後には逆流($U < 0$)の剥離域と高速流の領域が並列する。これを(ii)initial zoneとよぶ。噴流領域は流速分布がフラットに近いポテンシャルコアが形成される。ある程度流下すると剥離域の逆流が順流へと変化し、これとポテンシャルコアの混合が進む。この領域を(iii)developing zoneとよぶ。噴流領域の最大流速の半値を基準にして噴流幅が定義できる。通常の噴流ではこれは線形に増加することが知られている。またこの噴流の両端ラインを上流側に延長すると交点が得られる。これを仮想原点($x = x_{io}$)と定義し、噴流がみかけ上、この一点から発生すると解釈する。換言すれば円柱による上流側の影響範囲といえる。またこの領域では通常の2次元噴流のように流速分布や乱流統計量の自己相似性が成立することが期待される。以上の3つの領域の長さをそれぞれ、 L_u 、 L_i および L_d とする。さらに流下すると低速ストリークの加速および高速ストリークの減速によって最小流速が最大流速の半値に一致するとともに流れは横断方向に一樣な分布へと近づく。この領域を(iv)near uniform zoneとよぶ。この領域の初期位置では隣あう噴流の干渉が大きいと考えられる。

developing zone の噴流幅の半値 $\delta/2$ の分布を図-5および図-6に示す。ある x 位置における高速域とそれに隣接する低速域を考え、最大流速点とその半値点の距離を $\delta/2$ とした。ただし $n=1$ のケースでは最大流速点が正確に判定できないため評価の対象としない。図からケースによってはこのzoneの下流側から傾きが増加するが、いずれのケースにおいてもzoneの上流側では線形的に増加することがわかる。また図-5にみられるようにモデル本数が同一の場合、流速が最小のケースでは幅が最大となるが、流下方向への増加率(傾き)は流速の依存性は特にないようである。一方で図-6に示すように同一の断面平均流速の下では樹木本数が多いほど噴流幅の発達率

図-5 developing領域における噴流幅の変化($b/D = 3.85$)

図-6 developing領域における噴流幅の変化($U_m = 15 \text{ cm/s}$)

図-7 仮想原点位置の比較

が小さいことがわかる。

さてこの結果から線形変化する領域を対象に近似直線を上流側に引き、 $\delta/2 = 0$ となる位置を仮想原点 x_{io} とする。噴流がこの一点よりみかけ発生することを意味するものである。これより求めた x_{io} は図-7のようになる。流速よりも開口部幅による影響が大きいことがわかる。 $b/D = 3.85$ ではおよそ円柱径の5倍となる。本数が多く隣接する樹木間隔が小さい場合には噴流の発達が遅い。

センターに位置する樹木中心を通る x 軸上の流速分布を図-8および図-9に示す。それぞれ b/D および U_m に対する影響を比較した。すべてのケースにおいてゼロクロス点が存在する。円柱背後からこの点までがinitial zone(剥離領域)であり、抗力の発生に大きく関わる。 b/D が小さいほどinitial zoneが長く、より大きな抗力の発生が予想される。また流速が最小のケースではinitial zoneも最短となる。一方で図-8からは U_m が最小の場合には剥離域も最短となるが、 $U_m \geq 15 \text{ cm/s}$ については明確な傾向が認められないが、剥離域の生成が単純に接近

図-8 センター樹木中心軸に沿う主流速分布($U_m = 15\text{cm/s}$)

図-9 センター樹木中心軸に沿う主流速分布($n/D = 3.85$)

流速のみで整理できないことが示唆される。注意すべきは図-8と図-9のケース間のずれは同程度であり、図-8の間隔による差異は有意でないかもしれない。この点については今後も継続研究したい。 L_u および L_i ともに接近流速よりも樹木間隔の影響が支配的であり、これが小さいほど樹木背後の混合層の発達が遅くこれらの長さスケールはいずれも増加する。ただし剥離域の大きさだけでは抗力の発生特性は正確に決められないため、次節ではこれを実測する。

(2) 抗力計測

抗力係数 C_D の定義より円柱の抗力 F と断面平均主流速（接近流速） U_m の関係は次のとおりである。

$$C_D \equiv F / \left(\frac{1}{2} \rho A U_m^2 \right) \quad (1)$$

図-10は $b/D = 3.85$ における U_m と F の関係を示す。抗力は接近流速に対して増加するが、2次関数的な変化をもつことから、式(1)で定義する C_D 値は本実験の流速レンジにおいてはほとんど変化しないことが予想される。一方で図-11は $U_m = 15\text{cm/s}$ の下での樹木本数の影響を比較したものである。単一樹木 ($b/D = 7.69$) に比べて並列させた場合、明らかに F が増加する。これは図-7で述べたように樹木の隣接間隔により背後に形成される剥離域の長さが変化することによる。

図-12は樹木径 D と接近流速 U_m で定義したレイノル

図-10 抗力と接近流速の比較($b/D = 3.85$)

図-11 抗力と樹木間隔の比較($U_m = 15\text{cm/s}$)

図-12 レイノルズ数と抗力係数の関係

ズ数と抗力係数 C_D の関係である。図中には既往データ¹¹⁾のラインも伴示した。単一樹木の場合、 C_D がほぼ1となり既往データと一致することから本抗力計測の信頼性が示せた。注目すべきは並列になると単一樹木よりも C_D が12~14%程度増加することである。なお今回実験した Re 数の範囲 ($Re=2000 \sim 8000$) では同じ樹木本数であれば C_D の変化は小さいといえる。

(3) エネルギー減衰の定量評価

円柱の抗力 F は流れに対して仕事を行い、その結果、水流のエネルギーは減衰する。円柱から上流側に十分離れた横断面を単位時間に通過する水流が持つエネルギーは、断面平均主流速によって次のように定義できる。

$$E_o \equiv \rho g Q \left(\frac{U_m^2}{2g} + H \right) \quad (2)$$

図-13 エネルギー減衰効率と接近流速の比較($n/D = 3.85$)

図-14 エネルギー減衰効率と樹木間隔の比較($U_m = 15\text{cm/s}$)

図-15 エネルギー減衰効率の実験公式

つぎに単位時間の仕事 ΔE を考えて、エネルギー減衰効率を式(3)のように表す。

$$\eta \equiv \Delta E / E_0 \quad (3)$$

ここで $\Delta E = nFU_m$ である。図-13および14はそれぞれ U_m および b/D に対する η の変化を示す。これらの結果より減衰効率は樹木本数、すなわち隣接間隔が小さく、かつ接近流速が大きいほど高いことがわかる。図-13より η が流速すなわち Re の2乗に比例し、図-14より η が b/D の-2乗に比例すると仮定して図-15のように実験データにフィットさせると次の実験公式が得られる。

$$\eta = 0.166 \times (10^{-4} Re)^2 (b/D)^{-2} \quad (4)$$

この式のR2値は0.986で実測値と予測式のバラつきは小さい。水理条件が限定的ではあるが、接近流速、水深および樹木間隔がわかればエネルギー減衰が予測できる見通しがついた。

4. おわりに

本研究では水害防備林のエネルギー減衰特性に関して基礎的な知見を得た。室内開水路に樹木模型を並列させて本数と流速によって変化する抗力特性を明らかにした。同じ接近流速では本数が多い方が、隣接距離が小さくなるため高速域と低速域の差が大きくなる。これと関連して剥離域が流下方向に長くなるため、樹木林が受ける抗力が増加することがわかった。また抗力に対して流れが行う仕事分をエネルギーロスとしてエネルギー減衰効率を定義した。さらに樹木密度を考慮した減衰効率の実験式を提案した。今回はシンプルな模型に留まり、橋脚を対象とした流体力研究との差異が小さいが、本研究はあくまでも樹木による流体エネルギー減衰機能を対象とするものである。そこで今後は枝葉の影響や幹部の表面粗度の影響、さらには樹木背後に形成される乱流せん断層によるエネルギー消費および水面形が大きく変化する大流量ケースについても検討することを考えている。

本研究は(財)河川整備基金による研究助成の下で遂行された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 石垣泰輔, 馬場康之, 吉田由香: 京都周辺における伝統的水害防備法について: 京都大学防災研究所年報, 第45号B, pp.423-431, 2002.
- 2) 福岡捷二, 藤田光一, 平林桂, 坂野章: 樹木群の流水抵抗について, 第31回水理講演会論文集, pp.335-340, 1987.
- 3) 林建二郎, 辰野正和, 長林久夫, 橋本晴行, 多田毅: 単独樹木に作用する流体力評価, 応用力学論文集, Vol.67, pp.1 569-580, 2011.
- 4) 藤森裕子, 北村忠紀, 中川博次: ツルヨシの水理特性に関する基礎的研究: 土木学会第53回年次学術講演会, II-293, 1998.
- 5) Nepf, H.: Drag, turbulence and diffusivity in flow through emergent vegetation, *Water Resources, Research*, Vol.35, (2), pp.479-489, 1999.
- 6) Rominger, J.T. and Nepf, H.: Flow adjustment and interior flow associated with a rectangular porous obstruction, *Journal of Fluid Mech.*, Vol.680, pp.636-659, 2011.
- 7) Tanaka, N. and Yagisawa, J.: Flow structures and sedimentation characteristics around clump-type vegetation, *J. Hydro-environment Res.*, Vol.4, pp.15-25, 2010.
- 8) Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G. and Reid, M.: Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 134, (9), pp.1326-1332, 2008.
- 9) Noarayanan, L., Murali, K. and Sundar, V., Manning's 'n' coefficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration, *J. Hydro-environment Res.*, Vol.6, pp.51-62, 2012.
- 10) 石川仁: 樹木の流体力学特性の実験的解明, ながれ, Vol.24, pp.483-490, 2005.
- 11) 機械便覧, A5流体工学, 日本機械学会編, 1999.

(2012. 9. 30受付)