

樹冠部の変形に伴った樹木の抵抗について

秋田大学 学生員○今井健太郎 正会員 松富 英夫

1. はじめに 樹木は強風下においては樹冠部を変形させ流れを受け流す. この特性の理解は防備林を抵抗体と見立て, 津波や洪水からの減災利用を考える上で重要な課題となる. 長林ら¹⁾は風応力下における樹冠部の変形に伴った樹木の抵抗則に関する模型実験を行い抵抗係数の評価を行っているが, 実際の樹木に実験結果を還元するためには樹木の形状やヤング率に関する相似律を検討することが重要である. 松富ら²⁾は樹幹部の相似律を提案しているが, 樹冠部に関する相似律の検討例は皆無である.

そこで本研究では, 樹冠部の変形について簡単な解析解を導き, その空隙率に関する幾何学的相似律を提案する. また, 水理実験を通じて変形に関する解析解の妥当性を確認し, 変形率に伴った抵抗係数の変化を検討することを目的としている.

2. 樹冠部の簡単な変形モデルとその相似律

図-1のような等分布加重としての流体力を受ける片持ち梁に見立てた一本の枝を考える. 図中, l は枝長さ, l' は流れにより変形した枝の投影長さ, E は枝のヤング率, I は枝の断面2次モーメント, Δx は微少要素の長さ, dF は枝部に作用する流体力であり, 定常流中では式(1)で表現される.

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 dA \quad (1)$$

ここで, ρ は水の密度, C_D は抗力係数, U は流速, dA は枝の単位長さ当たりの総投影面積である.

張力を無視すると, 力の釣り合い式は式(2)となる.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - dF \sqrt{1 + (dy/dx)^2} = 0 \quad (2)$$

懸垂曲線の解法に習い, 撓み角を式(3)と仮定する.

$$dy/dx = \sinh ax \quad (3)$$

式(2)と式(3)から, 式(4)を得る.

$$y = \frac{1}{\alpha} (\cosh ax - 1) \quad (4)$$

ここで, $\alpha = (dF/EI)^{1/3}$ である. 一方, l と l' は式(5)の関係が成り立つ.

$$l = \int_0^{l'} \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx \quad (5)$$

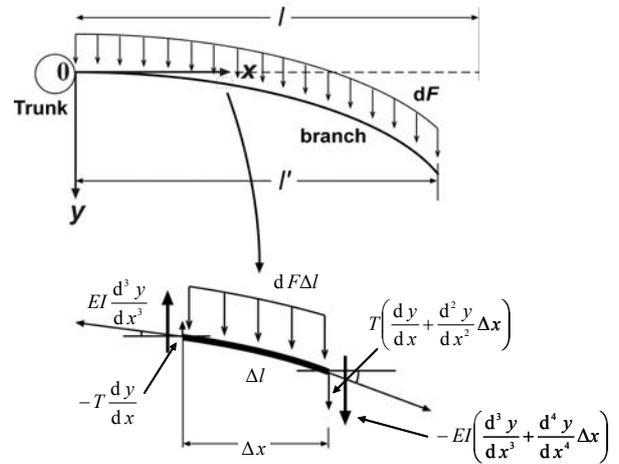


図-1 枝変形モデルの概略

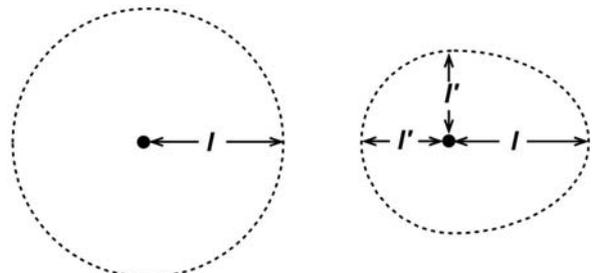


図-2 樹冠部包絡面積の変形概念

式(5)を積分することにより, l' は式(6)となる.

$$l' = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh} \alpha l \quad (6)$$

樹冠部の形状について, 図-2 のように変形前を円型, 変形後を半円と半楕円型の合成と考えると, 空隙率 e は式(7)で与えられる.

$$e = 1 - \frac{2dV_{\text{tree}}}{\pi l'(l+l)} \quad (7)$$

ここで, dV_{tree} は包絡面積に含まれる単位高さ当たりの体積である.

樹冠部の相似律に関して, 幾何学的な相似を満たすためには, 原型 p と模型 m の空隙率を同一にする必要があるため, 幾何学的相似律は式(8)となる.

$$e_p = e_m \quad (8)$$

流れ場の相似律をフルード則とし, 式(6), (7), (8)より, 式(9)を得る.

$$E_p / E_m = \lambda \quad (9)$$

ここで、 λ は模型縮尺である。この結果は松富ら²⁾と同様に、原型の枝に対応したヤング率を選択することにより、樹冠部の幾何学的な相似律が満足されることを示している。

3. 水理実験 水理実験には全長 12.0m, 幅 30.0cm の断面 2 次元鋼矩形環水路を用いた。測定項目と諸記号の定義を図-3 に、実験条件を表-1 に示す。図表中、 Q は流量、 U は接近流速、 H は水深、 F_x, F_z はそれぞれ水路床に水平、垂直な流体力、 S は水路勾配、 H_T, H_{TR} は模型の樹高と枝下高、 ρ_s/ρ は材質の比重である。樹木模型について、材質は低比重シリコンゴムを用い、可能な限りパイプモデル³⁾を満たすように幹と枝葉のバランスを考え作成した。水深については各ケース伴に $H=6.0\sim 8.0\text{cm}$ となるように下流端の堰で調節した。水深はポイントゲージを用いて測定を行い、接近流速は樹木模型から 50cm 上流においてプロペラ流速計を用いて測定を行った。 F_x, F_z は樹木模型下部に設置した 4 分力計により直接測定を行い、樹冠部の変形率 l'/l は樹木模型の上方と側方からデジタルカメラを用いて撮影を行い、画像処理を施して評価した。

4. 結果と考察 図-4 に C_D と l'/l の関係を示す。ここでの C_D は F_x と水面下の総投影面積から算出したものであり、樹木全体の平均的な値である。図から、ばらつきはあるものの、 l'/l が減少するに連れて C_D は減少することが判る。これは、樹冠部が縮小するため有効投影面積が減少することや、枝葉間の干渉効果が強まった結果と考えられる。MODEL-1 については材質が非常に柔軟であり、 l'/l の減少に伴った C_D の減少が顕著となった。次元解析と実験結果から C_D は l'/l のみで回帰され、 $R^2=0.85$ となった。しかし、 C_D のばらつきは大きく、今後再検討が必要である。

図-5 は l'/l の解析解と実験値の比較である。 l'/l の評価に用いた C_D は各模型の平均値とし、MODEL-1 は $C_D=0.4$ 、MODEL-2 は $C_D=1.0$ とした。また、参考のために $C_D=2.0$ の曲線も示してある。MODEL-1 においては本モデルと実験値は殆ど整合しない。これは本モデルに枝葉間の干渉効果が考慮されていないこと等が考えられる。MODEL-2 においては樹冠部の変形率が本実験条件では小さく、枝葉の相互干渉も小さいためか、多少のばらつきはあるが本モデルと実験値は整合することが判る。

5. おわりに 樹木樹冠部の変形率を単純なモデル

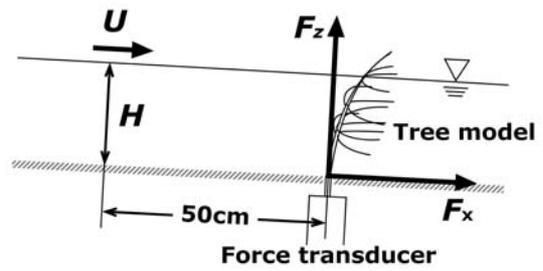


図-3 測定項目と諸記号の定義

表-1 実験条件

Q (m^3/s)	0.303, 0.415, 0.526, 0.636, 0.747 0.859, 0.968, 1.082, 1.192 ($\times 10^{-2}$)
S	1/200
H_T (cm)	10.0
H_{TR} (cm)	2.0
l (cm)	3.0
e	0.978
E (MPa)	Model-1 : $E=15.1(\rho_s/\rho=0.94)$ Model-2 : $E=76.7(\rho_s/\rho=1.56)$

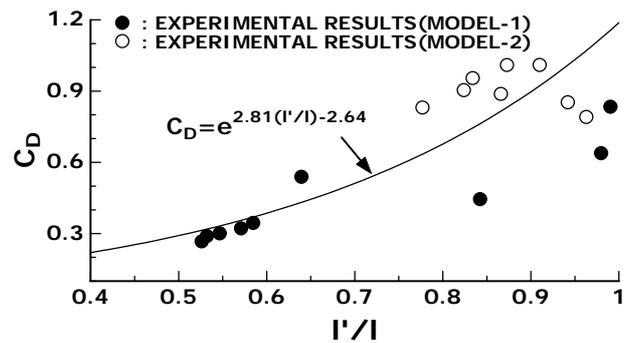


図-4 C_D と l'/l の関係

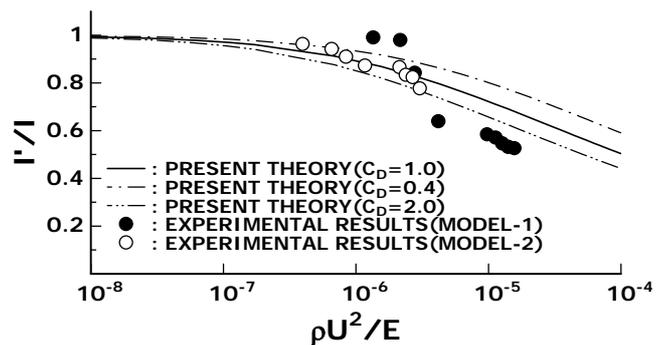


図-5 l'/l の解析解と実験値の比較

を用いて評価し、水理実験によりその妥当性や変形率に伴った抵抗係数を評価した。しかし、ばらつきも大きいので、今後は干渉効果等を考慮したモデルを検討していくことが必要である。

<参考文献> 1)長林ら：流体力の評価とその応用に関する研究論文集，第3巻，pp.31-36.2004. 2)松富ら：海工論文集，第51巻，pp.301-305.2004.3)今井ら：水工論文集，第49巻，pp.859-864.2005.