

樹木に作用する変動風力特性

林建二郎¹・多田 毅²・鈴木 覚³

1 元防衛大学校建設環境工学科

2 防衛大学校建設環境工学科

3 森林総合研究所

要旨：樹木に作用する流体力の把握は、防風林の防風効果や、高潮や津波に対する海岸林の防災効果の評価に重要である。本研究では、振動時の樹木に作用する変動風力特性を明らかにすることを目的として、小型実松（クロマツ）に作用する自然風と人工的突風の抗力特性を調べた。6分力計で検知される抗力は、「真の風力」の他に樹木振動による慣性力と構造減衰力が含まれている「見かけの風力(=バネ反力)」であり、樹幹の曲げ・せん断強度や耐地盤支持力の評価に重要である。「真の風力」は樹木の振動解析や流れの抵抗則評価に重要である。「見かけの風力」に対する周波数解析を行い、樹木振動による慣性力が加わる結果、「見かけの風力」の「真の風力」に対する増加現象を確認した。

キーワード：樹木、変動風力、自然風、突風、樹木震動

Fluctuating wind force characteristics acting on a tree

Kenjiro HAYASHI¹, Tuyoshi TADA², Satoru SUZUKI

1 Former Department of Civil and Environmental Engineering, The National Defense Academy 1

2 Department of Civil and Environmental Engineering, The National Defense Academy 2

3 Forestry and Forest Products Research institute 3

Abstract: Understanding the fluid force acting on a tree is important for evaluating the windbreak function of windbreak forests and the disaster prevention function of coastal forests against storm surges and tsunamis. In order to clarify the characteristics of fluctuating wind force acting on a oscillating tree, the drag forces acting on a small pine tree in natural wind and a small pine tree in artificial gusts. The force measured by the 6-component load cell is an “apparent wind force (= spring reaction force)” that includes the inertia force and structural damping force due to tree oscillation in addition to “true wind force”. “Apparent wind force” is important for the evaluation of shear strength and bearing capacity of ground support. As a result of adding inertia force due to tree oscillation, the increase of “apparent wind power” to “true wind power” is confirmed by using frequency analysis.

Key-word: Tree, Fluctuating wind force, Natural wind, Artificial gust, Oscillating tree

I はじめに

樹木に作用する流体力の把握は、防風林の防風機能や高潮や津波に対する海岸林の防災機能の評価に重要である。風の乱れにより樹木には変動風力が作用する。地盤に片持ち梁形式で弾性支持されている樹木は、この変動風力によって強制振動している。

樹木に作用する定常風力の研究においては、時間平均した風力と主流速度の関係が明らかにされているが、樹木に作用する変動風力の研究は、定常風力に関する研究に比べて少ない(1~7)。本研究は、振動時の樹木に作用する変動風力特性を明らかにすることを目的として、小型クロマツに作用する自然風と人工的に発生させた突

風による変動風力の6分力による直接計測結果(5, 6)にさらなる周波数解析結果を加えたものである。

II 樹木に作用する風力の定義と評価法

幹、枝、葉部の複雑な構造を有する樹木の振動は、多自由度系の強制振動であるが(6, 8)、自然風の乱れの空間分布変化を無視し、樹木に作用する風力の時間変動が、空間的な1点における風速変動に基づくと仮定すると、風方向の樹木振動は、(1)式で示す1自由度系の線形な強制振動方程式で近似できる(9)。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = D(t) \quad (1)$$

式中、 x ：樹木の代表変位、 m ：樹木の質量、 c ：粘性抵抗係数、 k ：バネ定数である。(1)式右辺の $D(t)$ は強制振動外力となる樹木に作用する「真の風力」であり、樹木の振動解析や樹木が有する流れの抵抗則の評価において重要である(5, 10)。左辺の kx は復元力(=バネ反力)であり、樹幹の曲げ・せん断強度や耐地盤支持力の評価に重要である。 kx ($=D(t) - m d^2x/dt^2 - c dx/dt$) は6分力計で検知される力であり、「真の風力」 $D(t)$ の他に樹木振動による慣性力($-md^2x/dt^2$)と構造減衰力($-c dx/dt$)が含まれている「見かけの風力」である(5, 10)。

簡略化のため、1質点における平均風向の変動風速 $v(t)$ のみを考え $v(t) = v_m + v'(t)$ と表す。ここに、 v_m は変動風速 $v(t)$ の時間平均(平均風速)、 $v'(t)$ は $v(t)$ の時間変動成分である。風速変動 $v(t) = v_m + v'(t)$ による樹木に作用する動的な「真の風力」(=真の抗力) $D(t)$ を(2)式で表す。

$$D(t) = \frac{1}{2} C_D A \rho (v_m + v'(t))^2 + C_m V \rho d \{v_m + v'(t)\} / dt \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{2} C_D A \rho (v_m^2 + 2 v_m v'(t)) \quad (3)$$

式中、 A ：無風時の樹木の代表投影面積、 V ：無風時の樹木の代表体積、 ρ ：空気密度である。(2)式の右辺第1項は風速の自乗に比例する抗力であり、 C_D は抗力係数である。(2)式の右辺第2項は風速の加速度に比例する仮想質量力であり、 C_m は仮想質量係数である。風の乱れ強さ $v'(t)$ の自乗による抗力成分や加速度による仮想質量力が省略できる場合は、 $D(t)$ は(3)式で近似できる(9)。

「真の風力」 $D(t)$ をフーリエ展開し、その周波数 f のフーリエ係数を $AD(f)$ とすると、(1)式の解である振動応答変位(=樹木の代表変位) x の周波数 f のフーリエ係数 $A_x(f)$ は(4)式で示される。

$$A_x(f) = (AD(f)/k) [1 / \{(1 - f^2/f_n^2)^2 + (2hf/f_n)^2\}^{1/2}] \quad (4)$$

式中の f_n と $h = c / \{2(mk)\}^{1/2}$ は、樹木の固有振動と減衰定数である。右辺の $M = 1 / \{(1 - f^2/f_n^2)^2 + (2hf/f_n)^2\}^{1/2}$ は増幅率であり、メカニカル・アドミタンスとも呼ばれている(9)。増幅率 M は周波数比(f/f_n)と減衰定数 h の関数である。 M/k は周波数応答関数を示す(11)。

III 小型実松(クロマツ)に作用する自然風の抗力評価

木箱内の土層に育成した小型クロマツ(静止時の樹高 $H_0=2.6\text{m}$ 、樹冠幅 $B_0=1.5\text{m}$ 、最大樹幹径 3.8cm)を、地上高 11m の屋上に設置した。時間変動する「見かけの風力」

kx と変動風速 $v(t)$ の同時計測には、6分力計(日章電機(株)、容量=200kgf)と3次元超音波流速計(METEK社製)を用いた(図-1参照)。サンプリング周波数=20Hz、計測時間=20分である。

「見かけの風力」 kx と代表風速 $v(t)$ の X 方向(北方向)成分を F_x 、 V_x とする。強風時の40秒間における、 F_x と V_x の同時記録例を図-2に示す。 V_x はまわりの建物の影響を受け、その突風率(=最大瞬間風速/ V_x の時間平均値)は、約2と高い値であった。 F_x と V_x の変動周期が長い(=低周波数成分)においては高い相関性が認められる。

自由減衰振動実験(II)より推定した本クロマツの換算質量 $m=2.53\text{gf}/(\text{cm}/\text{s}^2)$ 、減衰定数 $h=0.1$ 、固有振動数 $f_n=1.41\text{Hz}$ と、実測値である「見かけの風力」 $F_x=kx$ から算定した代表変位 x 、 dx/dt 、 d^2x/dt^2 を(1)式に代入し「真の風力」 $D_c(t)$ を逆推定した。「見かけの風力」の実測値 F_x と「真の風力」の推定値 $D_c(t)$ の比較を図-3に示す。「見かけの風力」 $F_x=kx$ の変動周期が短い高周波数周波数成分は、共振により顕著な慣性力が加わる結果、「真の風力」 $D_c(t)$ より増加している。

見かけの風力 F_x の瞬時流速 V_x 毎の抗力係数 $C_{d_x} = F_x / (0.5A\rho V_x^2)$ を求めた。代表投影面積は $A(=B \times H/2)$ 、 B 、 H ：静止時の樹冠幅と樹高)と近似評価した。 C_{d_x} と Re 数($=V_x H/\nu$ 、 ν ：空気動粘性係数)との関係を図-4に示す。 Re 数の増加に伴い樹木が傾倒する結果、実質の投影面積が減少する等の結果、 C_{d_x} は減少している(3)。

フーリエ解析を行い「見かけの風力」 F_x と「真の風



図-1. 自然風による風力計測

Fig.1 Wind force measurement using natural wind

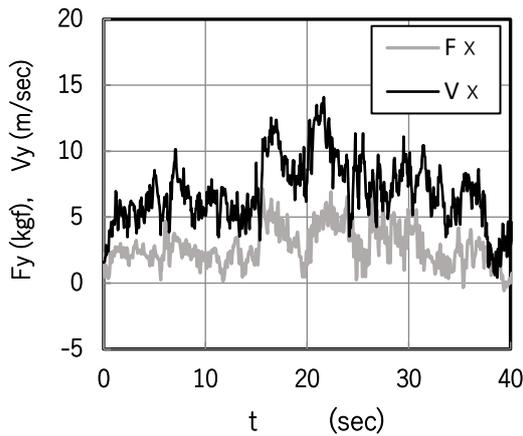


図-2. 変動する「見かけの風力」 F_x と風速 V_x の同時記録例

Fig.2 Example of simultaneous recording of fluctuating apparent wind force F_x and wind speed V_x

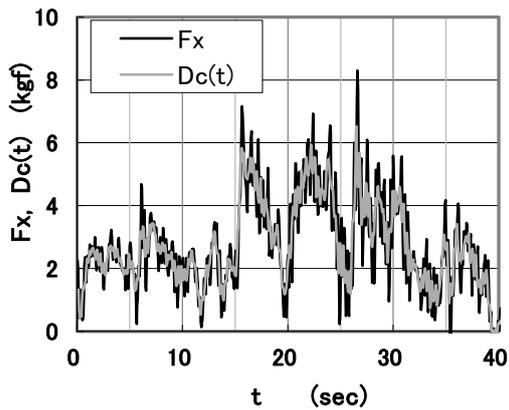


図-3. 「見かけの風力」 F_x と「真の風力」 $D_c(t)$

Fig.3 Apparent wind force F_x and true wind force $D_c(t)$

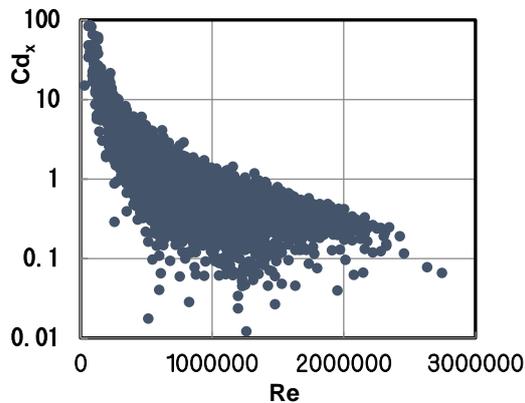


図-4 「見かけの風力」 F_x の抗力係数 C_{d_x} と Re 数

Fig.4 Drag coefficient C_{d_x} of apparent wind force F_x and Re number

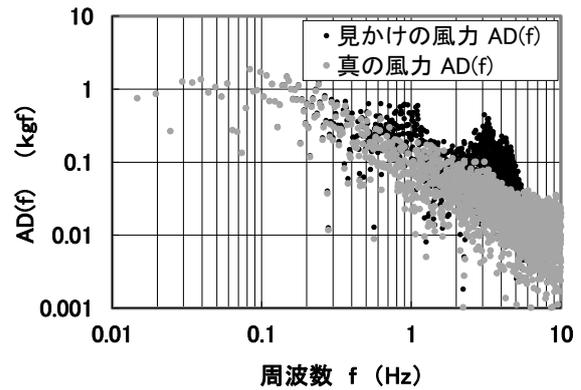


図-5. 「見かけの風力」 F_x (黒色丸)と「真の風力」 $D_c(t)$ (灰色丸)の線スペクトル

Fig.5 Line spectrum of Apparent wind force F_x and True wind force $D_c(t)$

力」の推定値 $D_c(t)$ の線スペクトル $AD(f)$ を算定した。 $AD(f)$ の周波数 f に対する変化特性を図-5に示す。周波数 $f=1$ Hz付近では樹幹部の共振により、 $2.5 < f < 5$ Hzの周波数領域では各小枝部の共振により樹木振動による慣性力が加わる結果、「見かけの風力」の $AD(f)$ は増加している。

以上より、小型実松(クロマツ)に作用する自然風の抗力特性においては、樹木振動による慣性力が加わる結果、「見かけの風力」の「真の風力」に対する増加現象が生じていることが確認できる。

IV 小型クロマツに作用する人工的突風の抗力評価

木箱内の土層に育成した小型クロマツ(高さ=86cm, 最大幅=44cm, 最大幹径=1.5cm, 図-6参照)を、送風機の前方に置かれた6分力計(日章電機(株), 容量=5kgf)に設置し、風方向に作用する抗力 F_x を計測した。代表風速 U の計測には3次元超音波流速計(METEK社製)を使用



図-6. 人工的突風による風力計測

Fig.6 Wind force measurement using in artificial gusts

した。風洞の吹出し口前に置かれた遮蔽板を急激に開放させ、静止風速から短時間で持続風の風速まで達する大きな時間変動風（突風）を発生させた。持続風の時間平均風速は22m/sとした。

実測値である代表風速 U の瞬時値 $v(t) = v_m + v'(t)$ を加速度項を無視した(2)式に代入して算定した、「真の風力」 $D_c(t)$ の時間 t に対する変化を図-7に示す。風速 U は $t = 9.7$ s から $t = 9.8$ s の短時間に、0cm/s から 2200 cm/s まで急速に変化し、その後は時間平均風速 $U_m = 2200$ cm/s の持続風となっている。「見かけの風力」 F_x も急速に増大し、突風終了直後の $t = 9.9$ s で $F_x = 860$ gf の最大値を示す。

自由減衰振動実験(II)より推定した本クロマツの換算質量 $m = 0.4$ gf/(cm/s²)、減衰定数 $h = 0.3$ 、固有振動数 $f_n = 2.25$ Hz と、上記の「真の風力」の計算値 $D_c(t)$ を(1)式に代入し「見かけの風力」 F_c を算定した。「見かけの風力」の実測値 F_x と算定値 F_c の比較を図-8に示す。突風終了直後で、「見かけの風力」の実測値 F_x が大きく増大する現象を算定値 F_c は評価している。

以上より、小型クロマツに作用する人工的突風の抗力特性においても、樹木振動による慣性力が加わる結果、「見かけの風力」 F_x の「真の風力」 $D_c(t)$ に対する増加現象を確認できる。

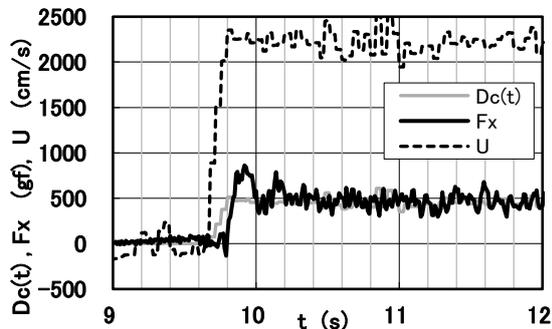


図-7. 人工的突風における代表風速 U 、「見かけ風力」 F_x と U より推定した「真の風力」 $D_c(t)$

Fig.7 Representative wind speed U , apparent wind force F_x and true wind force $D_c(t)$ estimated from wind speed U in artificial gusts

V おわりに

自然風や人工的突風における樹木には、変動風力と樹木の共振による慣性力が加わる結果、樹木に作用する「見かけの風力」は「真の風力」に対し増加する現象を1自由度系の線形振動方程式を用いて解析した。今後は、この振動解析問題に対する多自由度系線形振動方程式の適用について検討する予定である。

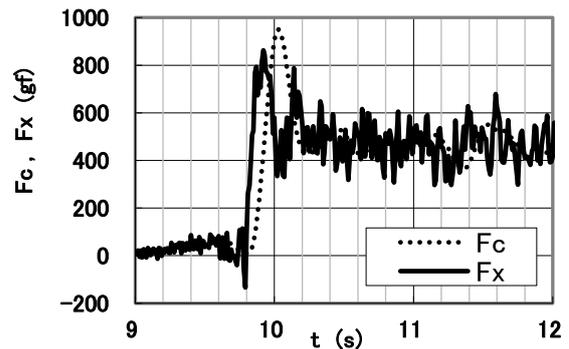


図-8. 人工的突風における「見かけ風力」の実測値 F_x と算定値 F_c

Fig.8 Measured value F_x and calculated value F_c of apparent wind forces in artificial gust

引用文献

- (1) 椎貝博美 (1993) 樹木の流水抵抗について. ながれ 12: 11-19
- (2) 林建二郎・赤木俊仁・藤間功司・重村利幸 (1994) 開水路中における樹木振動と流体力に関する基礎的実験. 水工学論文集 第 38 巻: 463-468
- (3) 林建二郎・辰野正和・長林久夫・橋本晴行・多田 毅 (2006) 単独樹木に作用する風力と流れ. 日本流体学会年会 2006 講演概要集: 6p
- (4) 鈴木 覚・林建二郎 (2016) 樹木に作用する流体力とその重心位置の測定手法に関する検討. H28 年度日本海岸林学会三沢大会研究発表会要旨集: 32-33
- (5) 林建二郎・鈴木 覚・多田 毅 (2018) 樹木に作用する変動風力の評価. H30 年度日本海岸林学会石垣大会研究発表会要旨集: 2p
- (6) 林建二郎・鈴木 覚・多田 毅 (2019) 海岸林 (小型クロマツ) に作用する変動風力の評価. 令和元年度日本海岸林学会秋田大会研究発表会要旨集: 2p
- (7) 本山淳一 (2009) 野外実験による抗力係数の推定. 平成 20 年度修士論文 北海道大学農学院 環境資源工学専攻: 78pp
- (8) 浅野敏之・松元千加子・国生大樹・坂井良輔 (2012) 海岸林樹木の幹や枝に作用する津波流体力の解析. 土木学会論文集 B3 Vol. 68: No.2, I 126-I 131
- (9) 石崎潑雄著 (1977) 耐風工学, 朝倉書店: 151pp
- (10) 林建二郎 (2009) 多分力計を用いた水理構造物に作用する衝撃的流体力評価, 応用力学論文集 第 12 巻: 851-858
- (11) 岡本舜三 (1971) 建設技術者のための振動学, オーム社: 222pp.