

樹形の違いを想定した小型平面模型の風力係数とその評価

福田耕司*1・杉山太宏*2・大川良輔*1・平岡克己*3

Coefficient of Wind Force and Its Estimation Using the Small Plane Model Assuming a Difference in Tree Form

by

Kohji FUKUDA, Motohiro SUGIYAMA, Ryosuke OHKAWA and Katsumi HIRAOKA

(Received on Mar. 31, 2004, accepted on June 16, 2004)

Abstract

A series of wind tunnel tests has been performed on the small plane model assuming a difference in tree form. The small plane model is manufactured with a tree crown part using plywood and plastic board (the form of each of five boards, whose area ranges from 144.5cm² to 450cm², differs) and a trunk part using vinyl chloride rod. Testing was conducted by making a steady wind act gradually from a wind velocity of 4m to 22m, and the rate of acceleration, which disturbed the flow of air artificially at each wind velocity, was measured. The wind force coefficient, C_D , of each small plane model was calculated from the experiment result, and the relationships between C_D and wind velocity, C_D and the aspect ratio of the plane model, and C_D and a dominant frequency were investigated. It was shown that the coefficient of wind force can be presumed from the area and the aspect ratio of the plane model by formulizing and arranging these relationships.

Keywords: Wind tunnel tests, Coefficient of wind force, Small plane model, Re-vegetation, Tree

1. 緒 言

環境対策の一環として、CO₂の吸収や景観を目的とした屋上緑化やのり面の樹林化など、緑化事業が注目されている。屋上緑化は、東京都が平成13年4月に改正した自然保護条例において、建物の新・増・改築時における屋上等の緑化を義務付けたことで脚光を浴びるようになった。乱立するビルの屋上を緑化することで、都市景観の向上、日常的な緑とのふれあい、鳥や昆虫を呼び戻すことによる自然性の回復等の効果が高まるとともに、二酸化炭素の吸収量の増加により地球温暖化対策への貢献ができるとしている。

これまでの法面緑化は、工事終了後、とにかく早期に緑化(みどり化)できることに主眼におかれ、発芽率が高く成長の早い主に外来種の草類が使用されてきた。しかし、近年では生態系や景観への配慮から、在来種による樹林化が推奨されるようになり、緑化技術の開発とともにその施工例も増加している。日本道路公団では、盛土・切土法面を積極的に樹林化する方針を示した¹⁾。防災的視点から法面上に侵入した樹木は、主として伐採してきたことを考えると180度の方向転換である。

のり面を樹林化するとCO₂の吸収や自然性の回復ばかりでなく、樹木の根系が地盤内に伸長することで地盤を補強する効果(プラス効果)が期待できる^{2,5)}。のり面の樹林化は、まさに現在の社会ニーズに合致した一石二鳥またはそれ以上の効果を併せ持つ緑化方法と言えよう。ではなぜ、これまで積極的な樹林

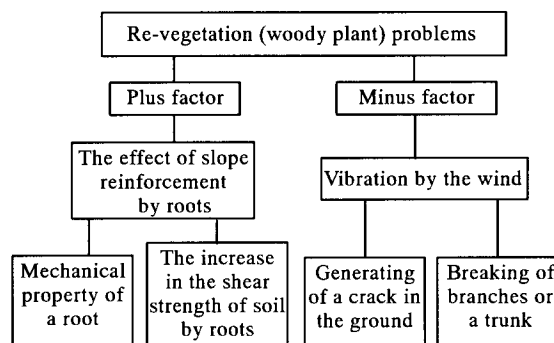


Fig.1 Mechanical and engineered subjects about the re-vegetation technique of woody plant communities on the artificial slopes

化がなされなかったのだろうか。これは、防災上の理由によるところが大きい。根系による地盤の補強効果よりはむしろ、台風などの強風による枝折れや倒木の可能性、樹木の振動が地盤を緩めて地盤強度を低下させるなどのマイナス効果を重視したためと考えられる。また、定期的な枝の剪定や落葉の清掃作業など、維持管理上の問題も考えられる。樹林化が推奨される今日ではあるが、これらマイナス要因の力学的あるいは工学的なメカニズムが解明された訳ではない。特に強風に対する樹木の抵抗力や樹木と地盤の振動を定量的に捉えるための工学的検討は、緑化事業における設計・施工・維持管理を行う上で非常に重要と考えられるが、関連する研究はこれまでほとんど行われていない。

このような背景のもと、著者らは法面樹林化の工学的なプラ

*1 東海大学大学院工学研究科土木工学専攻

*2 工学部土木工学科助教授

*3 工学部航空宇宙学科教授

ス要因とマイナス要因を Fig.1 のように大別して、それぞれについて室内試験を中心とした基礎研究を行ってきた⁹⁻¹¹⁾。この中で風による樹木と地盤の振動問題に関しては、風速、地盤材料、根鉢形状をパラメータとして、特に地盤の振動特性を評価することを目的に樹木平面模型による風洞実験を行っている⁹⁾。これらの実験から各パラメータの影響は確認できた。しかし、樹木あるいは樹木模型に作用する力(風力)が求められない限り、振動特性を正確に捉えることはできない。

本研究は、樹木に加わる風力を正確に評価するための基礎研究として、風力を算出する際に必要不可欠な風力係数 C_D について検討した。面積の測定が容易なことからこれまで使用してきた樹木平面模型を利用して、風洞試験と静的曲げ試験から C_D を計算し、模型の樹形・樹高・材質の影響を調べた。また、得られた結果をもとに C_D の簡便な推定方法を提案している。

2. 樹木の風力係数(抗力係数)と転倒抵抗力

本章では、樹木に作用する風力の評価式を示し、風力係数に関する既往の研究について概観する。また、風力が正確に求められると樹木の転倒危険度が推定できることを、転倒抵抗力についての既往の研究成果と関連させて述べる。

2.1 樹木が受ける風力(抗力)

物体が受ける風力(抗力) P (kgf)は、一般に式(1)で表される。

$$P = C_D \cdot \left(\rho_s \times \frac{v^2}{2} \right) \cdot A \quad (1)$$

ここに、 C_D は風力係数、 ρ_s は空気密度(=1.205kg/m³)、 v は風速(m/s)、 A は風を受ける面積(m²)である。樹木が受ける風力は、風の流線に直角な樹冠と幹が受け持つ形状抵抗と、樹冠表面の摩擦抵抗の和と考えられるので、式(1)では風力係数 C_D が両抵抗の和を表すパラメータとなる。樹木は、同じ種類でも樹齢や生育環境によって枝葉の伸長と繁茂は異なり、落葉樹では季節によって樹形が変化する。風力係数 C_D は、樹木1本毎に異なると言っても過言ではないだろう。

式(1)から明らかなように、風力 P は空気密度 ρ_s を定数とすれば、風速 v 、面積 A 、風力係数 C_D の関数である。樹木は風速によって樹冠が変形するため、面積 A は風速 v に依存すると考えられる^{10,11)}。この時、 C_D は一定値なのか、それとも風速によって変化するかを調べるのが重要である。しかし、樹木の抗力特性を系統的に検討した事例は比較的少ない。4半世紀以上前に行われた実験値を参考にしているのが現状である。

2.2 樹木の風力係数 C_D

実樹木の風力係数 C_D を風洞実験によって調べた例としては、Fraser¹²⁾、平田¹³⁾、樫山ら¹⁴⁾、Johnsonら¹⁵⁾の研究がある。実験には、樹高1m未満の針葉樹(マツ、スギなど)幼木が使用されており、得られた C_D は0.5~1.5(風速3 m/s~30 m/s)の範囲にある。

Fraserは、試験した4種類の樹木において、風速15m/sの C_D がトウヒ属の一種の0.57からアメリカツガの0.25の範囲にあることを示した¹²⁾。また、樹冠は風速の増加とともに流線型化してその投影面積が減少するため、 C_D は風速に対して直線的に増加すると推察した。平田は、無風時における樹冠の投影面

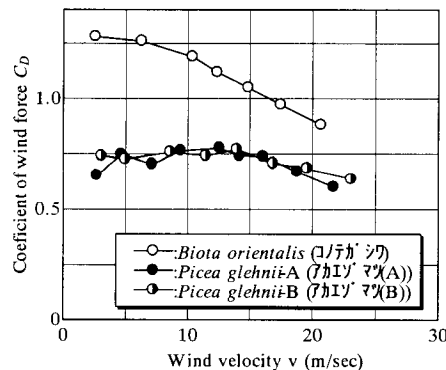


Fig.1 Relation between wind velocity and the coefficient of wind force calculated in projection area at the time of calm¹³⁾

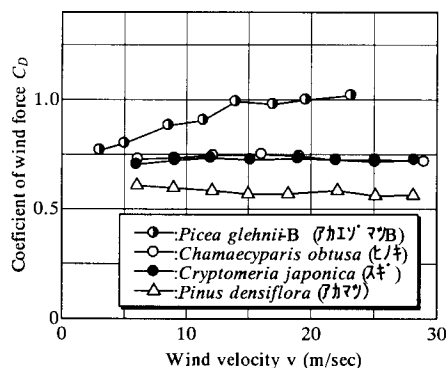


Fig.2 Coefficient of wind force calculated in projection area at the time of each wind velocity¹⁴⁾

積を使用して C_D を求め Fig.1 の結果を得た¹³⁾。風速の増加による樹冠面積の減少を考慮しない Fig.1 では、風速10m/s以上になると C_D は減少している。これに対して樫山らは¹⁴⁾、風で減少する樹冠の投影面積から C_D を計算し Fig.2 の結果を示している¹⁴⁾。Fig.1 よりも実際に近いと考えられる Fig.2 の C_D は、アカエゾマツ(B)を除きほぼ一定値を示している。

暴風時の枝折れや根返り被害は、最大風速20m/s以上で発生すると言われている。この時の C_D は、幼木を利用した数少ない Fig.1 と Fig.2 の結果から、今のところ0.5~1.0の範囲をとるであろうと見通せる程度である。

実樹木以外では、葉の形状、面積、密生度が実樹木と近似的に製作された4種類の樹木模型(モミジ、ケヤキ、シラカバ、ヒノキ、いずれも市販品)を使用した長林ら¹⁰⁾、林ら¹¹⁾の研究がある。彼らは、洪水時に水没する河道内樹木の抗力特性を評価することを目的に風速20 m/sまでの風洞実験を行った。開水路を利用した既往の研究を参考に、樹幹部と葉部の抗力 F がそれぞれ風速の2乗と1.5乗に比例すると仮定して、幹と葉の抗力ならびに抗力係数(風力係数)を算出している。また、風速の増加に伴い減少する投影面積を定式化して、抗力係数に与える影響を調べている。

2.3 風力と樹木の引き倒し(引抜き)抵抗力

農林業の分野では、台風や豪雨などに起因する山崩れや倒木の危険性、あるいは農地・林地開発の抜根や集材機用アンカーとしての根株強度を推定するために、多くの引き倒し(引抜き)試験が行われてきた¹⁶⁻¹⁹⁾。この試験は、樹木の根元にワイヤーロープを結び、樹木が転倒するまで一定速度で静的に引張力を

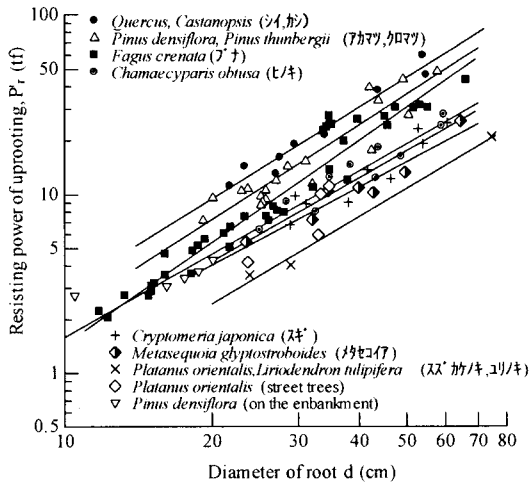


Fig.3 Relations between the diameter of root and resisting power of uprooting summarized by Karizumi²⁾

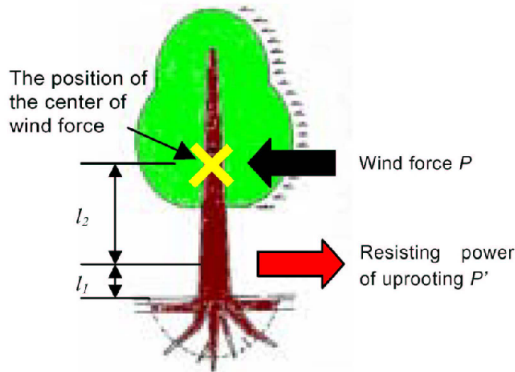


Fig.4 Power of acting on a tree

加え、転倒時の最大引張力を求めるものである。苧住は、この最大値を引き倒し抵抗力 P'_r として、樹木の根元直径 d との関係を図.3のようにまとめており²⁰⁾、引き倒し抵抗力 P'_r と根元直径 d は、両対数軸上で正比例の関係が認められる。図の実線は各樹木に対して求めた最小二乗法による近似結果で、式(2)のように表される。

$$P'_r = a \cdot d^b \quad (2)$$

係数 a と b は、広葉樹の平均値として $a=0.0188$, $b=1.78$, 針葉樹で $a=0.0174$, $b=1.90$ が得られている。なお前田らは、切土法面に侵入し自生した直径 5cm から 20cm の樹木 10 本に対して引き倒し試験を行った結果、直径が小さい場合の抵抗力は苧住が示した範囲よりも小さいことを報告している⁷⁾。

ここで、Fig.4 のように風力 P が地表面から h_1+h_2 の位置に作用し、抵抗力 P' を実験のように地表面から h_1 の位置に仮定する。動的に作用する風力 P と抵抗力 P' は、一般的に静的な式(2)の引き倒し抵抗力 P'_r よりも大きいと考えられるが、安全側に $P' = P'_r$ と仮定すれば地表面のモーメントから P' は式(3)のように表せる。この P' と P'_r を比較することで樹木の風による転倒危険度が判定できるので、そのためには樹木に作用する風力 P を正確に求めることが重要である。

$$P' = \left(\frac{h_1 + h_2}{h_1} \right) \cdot P \quad (3)$$

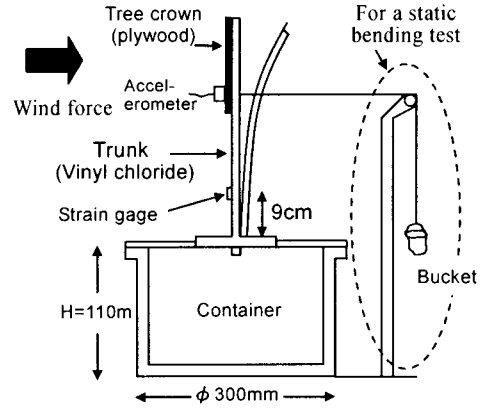


Fig.4 Schematic diagram of the tree model and a measurement apparatus set-up

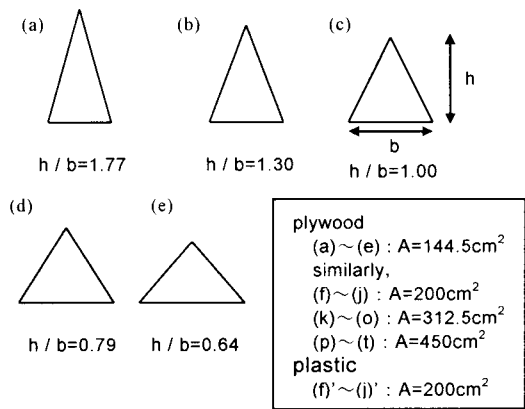


Fig.5 Aspect ratio of the plywood and the plastic board assumed as a tree crown

Fraser¹²⁾は森林内で樹高 18m のダグラスモミをハンドウィンチで引き抜き、その引き抜き力からモーメントを計算した。このモーメントを風洞試験で得るには風速 25m/s が必要で、後に同程度の樹木が最大瞬間風速 25m/s に近い暴風により倒木したことから、風洞試験結果の適用性は高いとしている。

3. 小型平面模型（樹木模型）と実験方法

3.1 小型平面模型

小型平面模型と実験装置の模式図を示したのが Fig.4 である。風で揺れる樹木をモデル化するために、適度な柔軟性を持つ 2 倍発泡塩ビ製の角材 (10mm×12mm, 長さ 410mm, E=180kN/cm²) を樹木の幹部に見立てて鉄製の土槽 (φ300mm×H110mm) の蓋に固定し、角材の伸縮量を測定するためのひずみゲージを根元から 9cm の位置に貼り付けた。

Fig.5 は、樹木の枝葉（樹冠）部に見立てた枝葉部模型の形状を示している。枝葉部形状と風力係数 C_D の関係を調べるために、同一面積で底辺 b と高さ h の異なる 5 枚 (縦横比 $h/b=0.64 \sim 1.77$) の三角形板 (ベニヤ板, 厚さ 5mm) を用意した。面積は 144.5cm² から 450cm² の 4 種類である。ベニヤ板は強風時にほとんど変形しないため、厚さ 0.5mm のプラスチック板の模型を 1 組作成してベニヤ板の結果と比較した。なお、樹木模型の作成に当たり実樹木との相似性は考慮していない。

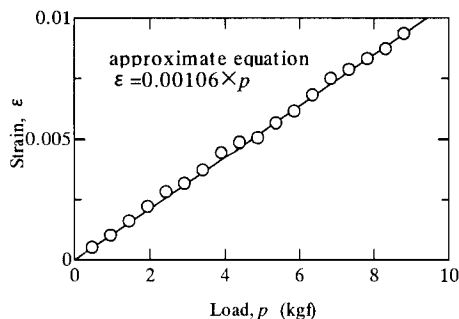


Fig.6 Relation between the strain and the load due to mass of round lead obtained from a static bending test

3.2 静的曲げ試験

枝葉部の風心点（高さ 25.7cm）に釣り糸で吊り下げたビニール袋を結び、鉛玉を 50g ずつ 850g まで载荷して幹部のひずみ ϵ を測定した。この静的曲げ試験で得られた荷重 p とひずみ ϵ の関係式に、風洞試験で測定した各風速で生じるひずみを代入して風力 P を求めた。

3.3 風洞試験

樹木模型を大型低速風洞装置（幅 150cm、高さ 100cm、最大風速 40m/s）に設置し、風速 4m/s からひずみゲージの許容を考慮して 22m/s まで、2m/s ずつ段階的に定常風を増加させ幹部のひずみ ϵ を測定した。プラスチック板では模型背面で写真を撮影して、風速の増加によって減少する面積をプランメータで測定した。また、各風速において、風洞装置前面の風心点の高さに L 型アングル（幅 5cm、長さ 200cm）を渡して風を乱し、風心点に設置した加速度計で加速度を測定して卓越周波数を求めた（計測時間：10sec、サンプリングタイム：0.005sec）。なお、Fig.5 に示した枝葉部模型は、各重心が風心点(25.7cm)と一致するように幹部に固定している。

4. 実験結果と考察

4.1 静的曲げ試験

静的曲げ試験から得られた荷重 p とひずみ ϵ の関係が Fig.6 である。この荷重内において幹部の塩ビ角材は弾性挙動を示し、最小自乗法によって $\epsilon = 0.00106 \times p$ （相関係数 0.998）と近似した。これを式(4)のように変形して、風洞試験で測定されるひずみから風力 P （荷重 p ）を推定した。

$$P = 943.4 \times \epsilon \quad (4)$$

4.2 風洞試験

(1) ベニヤ板

Fig.7 は、定常風を与えて発生した幹部のひずみ ϵ から式(4)によって風力 P を求め、風速 v との関係を示したものである。図は各面積の 5 つの枝葉部形状のうち、縦横比 h/b が 1 の結果を比較している。当然ながら面積が大きいほど風力は大きいこと、風速の増加に対する風力の増加率はほぼ等しく、図中に示した近似式（実線）のように、風力は風速のほぼ 2 乗に比例することがわかる。他の形状でも同じように風力は風速の 2 乗に比例し、その大きさは Fig.7 の結果とほぼ等しい。剛性の高いベニヤ板の場合、風速の増加によって後方には傾くが、最大風速 22m/s でもベニヤ板自身の形状は変化せず、無風時の形状を

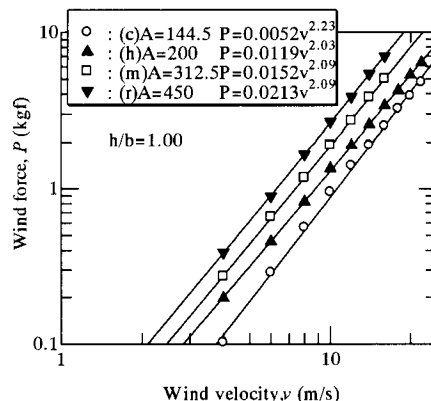


Fig.7 Relation between the strain and wind velocity obtained from a wind tunnel test using a plywood

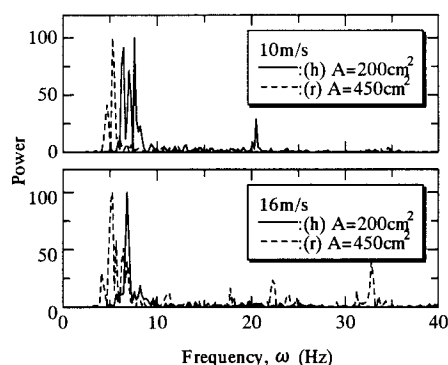


Fig.8 Result of Fourier analysis by the acceleration wave form

保っていた。面積の変化がなく、風力が風速の 2 乗に比例したベニヤ板の結果は、今回の試験に対する式(1)の適用性を確認したとも言えよう。

各風速で風を乱し、樹木模型を振動させて得られた加速度波形による FFT 解析結果の一例が Fig.8 である。図は枝葉部形状 (h) と (r)（縦横比 $h/b=1.00$ ）に対して、風速 10m/s と 16m/s の結果を比較している。(h) と (r) の卓越周波数 ω は風速によってほとんど変化せず、試験した風速の範囲内ではほぼ一定値を示した。これは他の試験にも共通していたので、後述する風力係数 C_D の推定にあたり、各ベニヤ板の ω は風速に依存しないとしてその平均値を使用した。同面積で縦横比 h/b が異なる場合の ω は、 h/b が大きいほど小さくなる傾向を示した (Fig.12 参照)。

(2) プラスチック板

ベニヤ板よりも柔らかく形状の異なるプラスチック板の風力 P と風速 v の関係を両対数軸にプロットした結果が Fig.9 である。縦横比 h/b が大きい、すなわち、高さ h が大きい (f) や (g) の風力が大きく発生している。これはベニヤ板では現れなかった現象である。ベニヤ板との違いとしてさらに注目される点は、ベニヤ板の風力が風速の 2 乗に比例したのに対して、プラスチック板では図中に記したように 5 つの形状とも約 1.5 乗に比例することである。より実樹木に近い 4 種類の樹木模型で風洞試験を行った長林ら¹⁰⁾、林ら¹¹⁾は、両者の関係が 2 乗から 1.5 乗の範囲となる結果を示しており、今回の試験結果と対応している。実際の樹木は三次元で、枝葉部は通風性を有する。しかし、この結果の対応は、単純化した平面模型でも樹木の抗力特性の検討が可能であることを示唆している。

風によって変形する枝葉部の投影面積 A と風速 v の関係を示

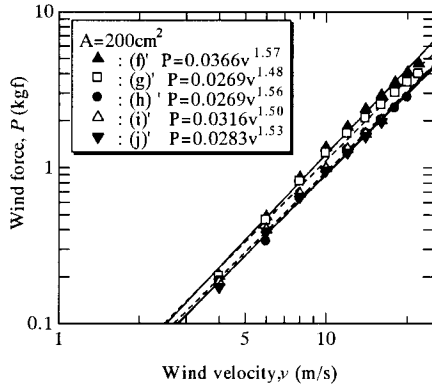


Fig.9 Relation between strain and wind velocity obtained from a wind tunnel test using a plastic board

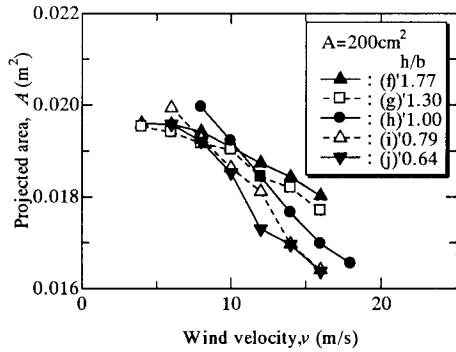


Fig.10 Relation between strain and wind velocity obtained from a wind tunnel test using a plastic board

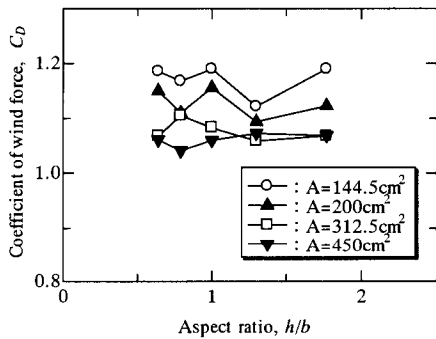


Fig.11 Relation between the coefficient of wind force and aspect ratio

したのが Fig.10 である。面積は風速 8m/s までほとんど変化しないが、これを越えるといずれも直線的に減少している。面積の減少割合は縦横比 h/b が大きいほど小さいことから、Fig.9 の風力の違いは投影面積の変化によるものと考えられる。

以上の結果から、樹木に作用する風力が面積に比例することは式(1)からも明かであるが、樹形にも大きく影響されることが推察される。

5. 風力係数 C_D の推定

実樹木の風力係数 C_D を正確に求めるには、超大型の風洞試験を行わざるを得ないが、現実には不可能である。2章で述べたように幼木や樹木模型を対象とした試験が行われているが、樹木の風力係数を推定する方法は今のところ存在しない。本章では、20種類のベニヤ板による試験結果から C_D を計算して面積 A 、縦横比 h/b ならびに卓越周波数 ω との関係を調べ、 C_D を

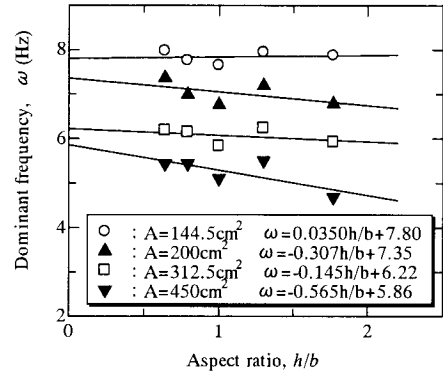


Fig.12 Relation between strain and wind velocity obtained from a wind tunnel test using a plastic board

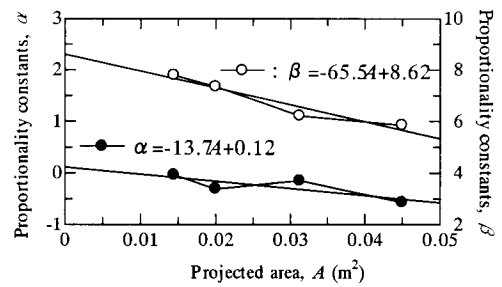


Fig.13 Proportionality constants α and β

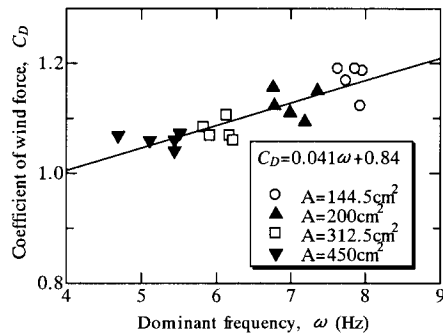


Fig.14 Relation between the coefficient of wind force and a dominant frequency

求める実験式を誘導する。

風洞試験からベニヤ板での風力 P は、風速の2乗に比例することがわかった。このことは、式(1)から明らかなように、風力係数 C_D が風速によらず一定であることを表している。

Fig.11 は、この C_D と縦横比 h/b の関係を面積ごとにプロットしたものであるが、ばらつきが大きく相関性は低い。そこで、もう一つの測定値である卓越周波数 ω と h/b の関係を調べたのが Fig.12 である。やはりデータのばらつきは見られるが、 ω は h/b と面積が大きいほど小さくなり、Fig.11 よりは相関性が高いと言える。両者を面積ごとに直線で近似して(式(5))その結果を図中に示した。式(5)の係数 α と β は Fig.13 のように面積 A に比例するので、両係数の近似式を式(5)に代入すると、 ω を面積 A と縦横比 h/b の関数として表す式(5)'が得られる。

$$\omega = \alpha \cdot \left(\frac{h}{b}\right) + \beta \quad (5)$$

$$\omega = (0.12 - 13.7A) \cdot \left(\frac{h}{b}\right) - 65.5A + 8.62 \quad (5)'$$

全ての卓越周波数 ω と C_D の関係を調べたのが Fig.14 である。

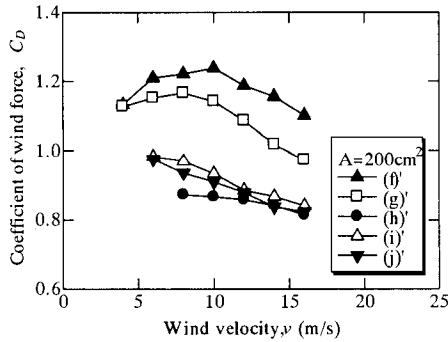


Fig.15 Relation between the coefficient of wind force and wind velocity with a plastic board

面積が小さいほど ω ならびに C_D が増加する様子が観察される。この近似式(6)に式(5)'を代入することで、 C_D は面積 A と縦横比 h/b の関数として式(6)'のように表すことができる。

$$C_D = 0.041\omega + 0.84 \quad (6)$$

$$C_D = (0.0049 - 0.56A) \cdot \left(\frac{h}{b}\right) - 2.69A + 1.19 \quad (6)'$$

風力係数 C_D と枝葉部を模したベニヤ板の面積 A ならびに縦横比 h/b に直接的な相関性は低いですが、これらの関係に卓越周波数を介在させることで、ベニヤ板の形状のみから C_D を推定できることが明かとなった。

なお、プラスチック板の C_D は、Fig.15 のように風速と枝葉部形状の影響を強く受ける。式(6)'を導くほど単純でないことは想像にやさしいが、試験を継続して簡便な C_D 推定法の構築を目指したい。

6. 結 言

樹木の風力係数 C_D を評価するために、小型平面模型の材質と形状を変えて風洞試験を行った。得られた結果は以下のように要約される。

- (1) ベニヤ板のひずみ（風力）は風速のほぼ2乗に比例し、プラスチック板では約1.5乗に比例する。より実樹木に近い樹木模型を使用した既往の研究では、2乗から1.5乗の範囲となることが示されているので、今回の単純化した平面模型でも樹木の抗力特性の検討が可能である。
- (2) 風を乱して測定した加速度波形のFFT解析によるベニヤ板の固有周波数 ω は、22m/sまでの風速によって変化しないが、形状と面積には影響される。
- (3) プラスチック板の投影面積は、風速8m/sを越えると直線的に減少をはじめ、その割合は縦横比 h/b が大きいほど小さい。
- (4) 風力係数 C_D とベニヤ板の面積ならびに縦横比 h/b に直接的な相関性は低いですが、 C_D と卓越周波数 ω には大域的に正比例の関係が存在する。この ω と縦横比の相関性を利用して、ベニヤ板の形状のみから C_D を推定できる実験式を誘導した。

今回の試験において、実樹木との相似則などは一切考慮していない。また、実験条件も限られており、基礎的研究という位置付けにおいても、データ数は限られたものである。しかし、推定法のない樹木の風力係数が、枝葉部の面積と縦横比により得られる可能性を指摘できた点は意義のあるものと思われる。より実樹木の挙動に近いと考えられるプラスチック板の実験を

追加すると同時に、実樹木の振動特性も調べていく必要がある。

参考文献

- 1) 上村恵也：グリーンハイウェイ宣言，日本緑化学会誌，特集「行政における緑化の取り組み」，Vol.26, No.2, pp.29-33, 2000.
- 2) O'Loughlin, C.L.: A study of tree root strength deterioration following clearfelling, Can. J. For. Res., pp.107-113, 1974.
- 3) 阿部和時：樹木根系が持つ崩壊崩壊防止機能の評価方法に関する研究，森林総研研報，No.373, pp.105-181, 1997.
- 4) 塚本良則：森林は斜面崩壊の抑止にどれだけ役立っているか，森林科学，No.3, pp.45-51, 1991.
- 5) Luckman, P.G., Hathaway, R.L. and Edwards, W.R.N. : Root system, root strength and slope stability, Water and soil conservation, Ministry of Works and Development, Internal Report, No.34. 31pp, Wellington, 1982.
- 6) 杉山太宏，福田耕司，大塚泰洋，赤石勝：樹木根系の法面補強効果に関する一考察，土木学会第29回関東支部技術研究発表会，pp.1042-1043, 2002.
- 7) 前田浩之助，杉山太宏，赤石勝：関東ロームの切土斜面上に自生した樹木の転倒危険度，土と基礎，地盤工学会，Vol.49, No.5, pp.8-11, 2001.
- 8) 福田耕司，杉山太宏，大塚泰洋，赤石勝：樹形の違いを想定した樹木模型の風力係数，日本緑化学会誌，Vol.29, No.1, pp.235-238, 2003.
- 9) 大塚泰洋，杉山太宏，赤石勝：風荷重による模型樹木の振動実験，第56回年次学術講演会講演概要集，第7部門，pp.570-571, 2001.
- 10) 長林久夫，辰野正和 他：風応力下における樹木の抗力特性に関する検討，流体力の評価とその応用に関する研究論文集，土木学会水理委員会，Vol.2, pp.91-95, 2003.1.
- 11) 林建二郎，辰野正和 他：単独樹木に作用する風力計測，流体力の評価とその応用に関する研究論文集，土木学会水理委員会，Vol.2, pp.96-103, 2003.1.
- 12) Monteith, J. L. (及川武久訳)：生物環境物理学—生態学とフラックス—，共立出版株式会社，pp.74-76, 1975.
- 13) 平田種男：伐採列区構成に関する基礎的研究(第2報)，樹木の風圧中心と抵抗係数，特に林衣の一効果に就いて，東京大学農学部演習林報告，45：67-87, 1953.
- 14) 檜山徳治，高橋啓二，土井恭次，坂上幸雄：林木の気象被害，日本林業技術協会，pp.67-72, 1974.
- 15) Johnson, Jr.R.C., Ramey, G.E. and O' Hagan, D.S. : Wind Induced Forces on trees, JFE, Vol.104, March, pp.25-30, 1982.
- 16) 中村英碩：林業機械の効果的作業技術，林業試験場研究報告，第225号，pp.1-29, 1969.
- 17) 玉手三棄寿，檜山徳治，笹沼たつ，高橋亀久松：立木引き倒し試験，日本林学会誌，Vol.47, No.5, pp.210-213, 1965.
- 18) 上田 実 他：集材架線用アンカー（根株・立木）の強さ試験，第80回日本林学会講演集，pp.364-366, 1969.
- 19) 北村嘉一，難波宣士：抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能，林試報告，第313号，pp.175-208, 1981.
- 20) 苅住 昇：樹木根系図説，誠文堂，pp.101-111, 1980.