

葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験

WIND TUNNEL EXPERIMENTS ON DRAG COEFFICIENT OF TREES
WITH THE LEAF AREA DENSITY AS A REFERENCE AREA

神山健二*, 大橋征幹**, 成田健一***

Kenji KAMIYAMA, Masamiki OHASHI and Ken-ichi NARITA

Drag coefficient of trees was investigated with wind tunnel experiment using real young trees. After the measurement of drag force in several wind speed conditions, the leaf area density were counted every 10cm cubic space by cutting whole leaves within them. Then drag coefficient of tree was calculated using this leaf density as a reference area. The results obtained were as follows.

1. Wind velocity distribution behind tree was mainly dependent on the total leaf area and local arrangement of leaves.
2. The drag coefficient of trees whose shape is largely deformed by wind force becomes smaller with increasing wind velocity.
3. The leaf area density could partly explain the variation of tree's drag coefficient, though these relations were not so clear for some kinds of trees which have extremely crowded foliage or considerably apart from each other on the contrary.

Keywords : Leaf area density, Drag coefficient, Windbreak, Wind tunnel experiment

葉面積密度、抵抗係数、防風林、風洞実験

1. はじめに

都市部において地表面の舗装化、コンクリート造建物の増加により屋外熱環境の悪化が進行している。環境に対する負荷の軽減や人と自然の共生を踏まえた環境形成が社会目標となり、屋外熱環境という観点から土地被覆の緑化や建物周辺の植栽を有効に取り入れた都市計画や建築計画が求められている。これまで、緑の微気象緩和効果¹⁾や樹木の配置方法の適正化²⁾などが研究されているが、実務設計に取り入れるための具体的な効果や方法について明確なものはない。特に樹木まわりの気流性状については農業気象分野で多く見られ、例えば Kondoらは植物キャノピー内の気流性状を対象とした樹木のモデル化³⁾を行っている。また佐藤らは防風林を対象にした森林内の風速鉛直分布のシミュレーションを森林の表面積、個々の樹木の抵抗係数、草丈や樹高をパラメータとして行っている⁴⁾。しかし、植物キャノピーの研究では鉛直方向に様な1次元モデル、防風林の研究では水平方向に様な2次元モデルとして扱われており、3次元性の強い建物まわりの流れ場に適用することは困難であり、個々の樹木に対する葉の分布状況、流体抵抗なども整備されていない。また、建築分野においても高層建物の風害防止の観点から樹木まわり風速分布、流体抵抗に関する研究例⁵⁾があるが見付面積を代表面積として抵抗係数を算定したもので、樹木の厚みが考慮さ

れていない2次元的な扱いをしている。

以上のような背景から、本研究では葉面積密度を代表面積とし、樹木の風に対する影響を風洞実験によって検討することで樹種別の抵抗係数を気流条件との関係で明らかにし、建物まわりの樹木配置の適正化に役立てる。以下に本研究の要点をまとめる。

- (1) 樹木を3次元の物体として考え、葉面積密度の空間分布を測定することで、樹種別の葉の分布状況を明らかにする。
- (2) 樹木まわりの風速分布を測定し、葉面積密度の違いが気流性状に与える影響について検討する。
- (3) 抵抗係数と樹種の間を分析し、葉の特徴(堅さ、大きさ、間隔)と抵抗係数の関係を明らかにする。
- (4) 葉面積密度や抵抗係数のばらつきを調査し、一般的な抵抗係数の範囲を明らかにする。
- (5) 抵抗係数算出時における代表面積の取り扱いの違いによる抵抗係数への影響を明らかにする。

2. 抵抗係数についての定義

物体に働く抗力は(1)式で表される。抵抗係数は代表面積 a の扱いにより変化する。樹木の場合、前述のように建築分野では見付面積⁶⁾を代表面積にして抵抗係数の算出を行ってきた。しかし、求めた

本研究は文献7)をもとに加筆・修正を加えたものである。

* 飛鳥建設㈱

** 国土交通省国土技術政策総合研究所

*** 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

Tobishima Corporation

National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

抵抗係数 cf を風向の特定できない3次元の流れ場を対象とした数値シミュレーションに適用するためには農業気象分野で行われている植物群落と同様に葉面積密度を代表面積とし、単位体積あたりの抗力で抵抗係数 cf を算定する必要がある。風速 U についても2次元の扱いでは基準の流入風速をそのまま与えていたが、樹木を3次元の物体と考えると葉面積密度の測定メッシュごとに風速を与えるため、樹冠内部の風速分布を考慮しなければならない。葉面積密度を代表面積にした場合、樹木全体の抗力 Fd は各メッシュ毎の抗力 Fd_i の総和と考える (図1参照)。

$$Fd = \frac{1}{2} \rho a c f U^2 \dots\dots\dots(1)$$

Fd : 抗力 (N)

ρ : 空気密度 (kg/m^3)

a : 代表面積 (m^2)

cf : 抵抗係数

U : 風速 (m/s)

3. 実験概要

3.1 対象樹木

建物近傍に植樹として使用される樹種の中から葉の形状、大きさなど分布状況の違うものを5種類選定した。選定条件としては、樹高 (H) が1m程度でも成木に近い樹形を有するものとした。表1に実験対象樹木を示した。なお、風洞の測定部断面積は 5.2m^2 ($2.6\text{m} \times 2.0\text{m}$) で樹木設置時の閉塞率は最大約11%となる。

3.2 実験気流

従来の樹木の風洞実験⁹⁾では乱れの少ない一様流で実施されている。建物近傍の樹木を考えた場合、気流の乱れによる影響が懸念されるため、乱れ性状を考慮した実験を行う必要がある。抵抗係数は乱れの強さの影響を受けることが予想されるため、乱れの強さ5%以下の気流 (以下、乱れ小) と乱れの強さ5~12%の気流 (以下、乱れ中)、乱れの強さ12~20%の気流 (以下、乱れ大) の3種類にわけて実験を行った。図2に実験気流の風速および乱れの強さの鉛直分布を示した。風速は既往の研究例⁹⁾を参考に、風洞内基準風速 ($Z=1,400\text{mm}$) で3, 5, 10m/sの3段階とした。

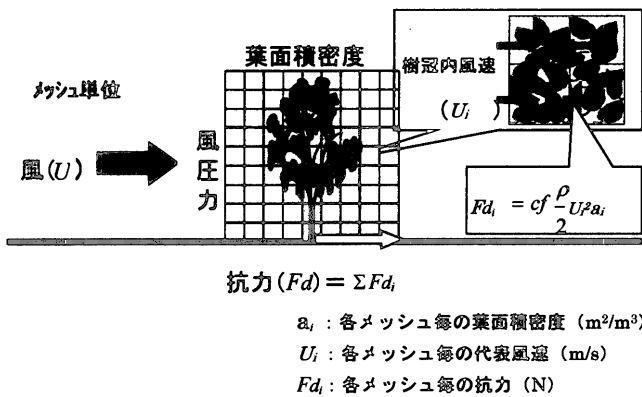


図1 葉面積密度を代表面積とした場合の抗力

a_i : 各メッシュ毎の葉面積密度 (m^2/m^3)
 U_i : 各メッシュ毎の代表風速 (m/s)
 Fd_i : 各メッシュ毎の抗力 (N)

3.3 実験ケース

表2に実験ケースを示した。乱れの強さの違いによる影響の検討はサザンカを用い、他の樹種については風速の違いによる抵抗係数の変化を検討した。測定項目としては抗力、樹木周辺の風速分布、樹冠内の風速分布、葉面積密度の測定とした。

3.4 測定方法

①風速測定方法

樹木まわりの風速分布は2台の5cm スパンの超音波風速計を支柱に固定し、10Hzで30秒間の測定を行った。測定箇所はX方向 (主流方向) で樹木中心を0、主流方向をプラスとした-1,000mm~+4,000mmの範囲、Y方向 (主流直角方向) で樹木中心を0とした

表1 実験対象樹種

樹種	種類	葉の特徴	樹高H	葉張りW	葉張りD
サザンカ	常緑広葉樹・中木	大きさは約5cmで堅い	940mm	600mm	600mm
コブシ	落葉樹・高木	大きさは約10~15cmで柔らかい	950mm	600mm	600mm
サンゴジュ	常緑広葉樹・中木	大きさは約10cmで堅く厚い	885mm	500mm	500mm
シラカシ	常緑広葉樹・高木	大きさは約5cmで柔らかい	860mm	600mm	600mm
ナツツバキ	落葉樹・高木	大きさは約5cmでやや厚い	980mm	580mm	520mm

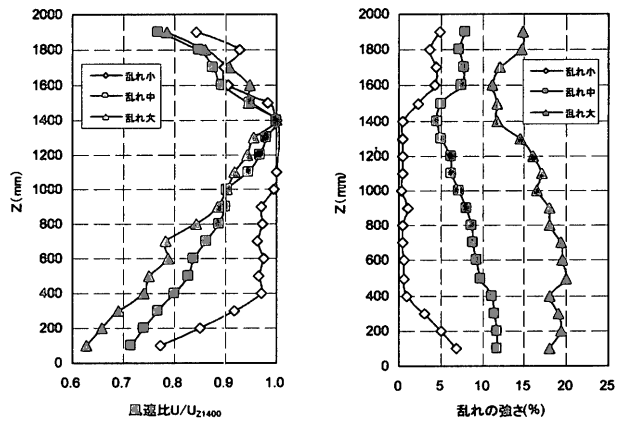


図2 実験気流の鉛直分布

表2 実験ケース

ケース	樹種	実験気流			測定項目
		基準風速3m/s	基準風速5m/s	基準風速7m/s	
1	サザンカ1	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
2	"	○	○	○	
3	"	○	○	○	
4	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
5	"	○	○	○	
6	サザンカ2	○	○	○	
7	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
8	"	○	○	○	
9	コブシ1	○	○	○	
10	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
11	"	○	○	○	
12	コブシ2	○	○	○	
13	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
14	"	○	○	○	
15	サンゴジュ1	○	○	○	
16	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
17	"	○	○	○	
18	サンゴジュ2	○	○	○	
19	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
20	"	○	○	○	
21	シラカシ1	○	○	○	
22	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
23	"	○	○	○	
24	シラカシ2	○	○	○	
25	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
26	"	○	○	○	
27	ナツツバキ1	○	○	○	
28	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
29	"	○	○	○	
30	ナツツバキ2	○	○	○	
31	"	○	○	○	葉面積密度、抗力、風速
32	"	○	○	○	

±100mの範囲、Z方向（鉛直方向）で100～1,900 mの範囲とした。樹冠内の風速分布はフレキシブルな無指向性サーミスタ風速計を枝に這わせながら樹冠内部に15点設置し、10Hzで200秒間測定した。写真1に風速測定状況を示した。

②抗力測定方法

抗力は樹木の根と幹の境界部分を切断し、ボルトにより治具に固定したものを6分力風力天秤に設置して100Hzで20秒間測定を行った。天秤の較正は図3のように滑車台に重りをぶら下げ、ワイヤーをなるべく樹木の中心軸上で引っ張りによるたわみの少ない部分に設置して行った。

③葉面積密度測定方法

風速、抗力の測定終了後、樹木を立体的に100mmメッシュに分割し、各メッシュ毎に刈り取った葉の片面をスキャナーで読み込みドット数から葉面積を求めた。枝に関しては、その表面積の1/2を葉面積に加えた。樹木全体の体積は葉または枝の存在するメッシュの総和から求めた。

3.5 抵抗係数の算出方法

風速 U 、代表面積 a は各メッシュごとの風速と葉面積密度を用い、全メッシュの和で抗力 F_d と釣り合うように抵抗係数 cf を求めた。風速 U については樹冠内風速測定ポイントがあるメッシュはそのまま測定値を使い、測定ポイント間にあるメッシュは直線補間して与えた。ただし、最も風上側にあるメッシュについては流入風速をそのまま適応した。

4. 実験結果および考察

4.1 葉面積密度分布

樹木を立体的にメッシュ分割し、各メッシュ毎に葉を刈り取ることで、樹冠内部での葉の分布状況を明らかにすることが出来る。同じ樹種の個体差を少なくするため樹高、葉の広がりやつき方が似ているものを選定して測定を行った。図4に各樹種の葉面積密度分布を示した。これは樹木中心での風流れ方向断面(XZ断面)と風直角方向断面(YZ断面)の葉面積密度分布を示している。また、表3に各樹種の樹木全体の葉面積密度を示した。

①サザンカ

サザンカは葉が小さく密集しているため、最大の葉面積密度は30 (m^2/m^3)となった。全体的に樹冠の中心部の密度が高くなっており、サザンカ1とサザンカ2を比較すると個体差も大きい。

②コブシ

コブシは葉が大きいため、刈り取ったメッシュ内の葉の有無で葉面積密度の差が大きくなる。最大の葉面積密度は15～20 (m^2/m^3)程度であり、コブシ1とコブシ2を比較すると樹木全体の葉面積密度が5～6 (m^2/m^3)の間で個体差が小さい。

③サンゴジュ

サンゴジュはコブシと同様に葉が大きく、密集する葉群が点在して構成されている。サンゴジュ1は葉面積密度が10 (m^2/m^3)以下がほとんどなのに対して、サンゴジュ2は幹や枝付近を中心として葉面積密度が10～15 (m^2/m^3)の範囲が多い。樹木全体の葉面積密度を比較してもサンゴジュ1が4.54 (m^2/m^3)、サンゴジュ2が7.10 (m^2/m^3)と個体差が大きい。

④シラカシ

シラカシはサザンカと同様に葉が小さく密集している。最大の葉面積密度は20 (m^2/m^3)程度であるが、まんべんなく密度は高い。シラカシ1とシラカシ2を比較すると樹木全体の葉面積密度が5～6 (m^2/m^3)の間で個体差は小さい。

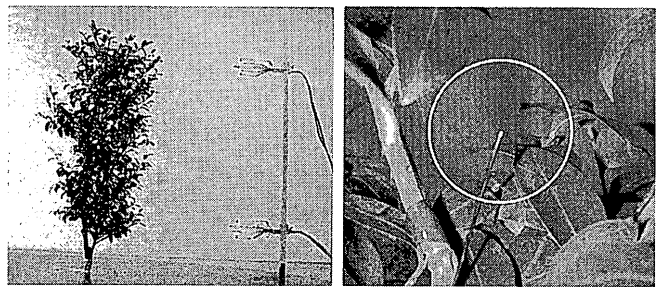
⑤ナツツバキ

ナツツバキは全体的に葉面積密度が低く、枝と枝の間の空隙部分が多い。ナツツバキ1とナツツバキ2を比較すると樹木全体の葉面積密度が3～5 (m^2/m^3)の間で個体差は大きい。

4.2 樹木まわりの風速分布

①乱れ性状の違いによる変化

気流の乱れの違いによる樹木まわりの風速分布の比較を行った。樹種は実験による劣化が最も少ないサザンカとした。図5に樹木中心における流れ方向の風速分布を示した。葉の密度が高いZ=200～800mmでの値を高さ平均すると樹木の風下直後(X=400mm)の風速比については気流の乱れに関係なく約0.3～0.4と同程度であるが、樹木の風下4000mmと距離が離れると乱れ大、中、小の順に風速の回復が遅くなっている。図6に樹木中心における風速鉛直分布を示した。樹木の風下4000mmにおいて乱れ中と乱れ大は高さ400mmにおいて風速の回復が遅れている。乱れ小はどの高さでも風速の回



樹木まわりの風速測定状況

樹冠内風速測定状況

写真1 風速測定状況

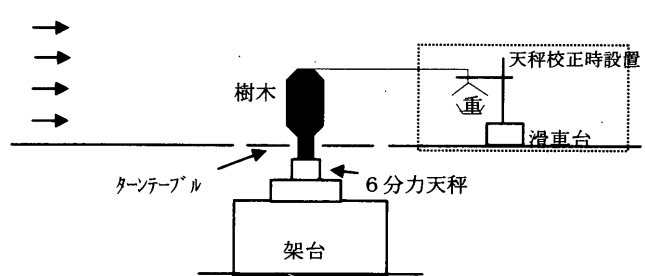
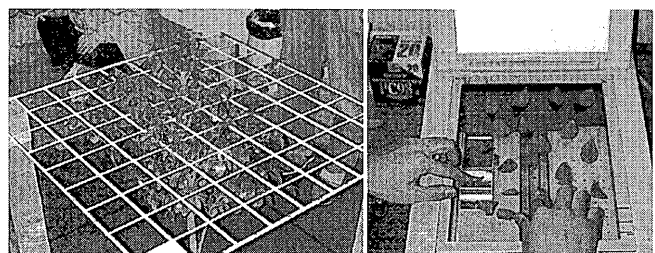


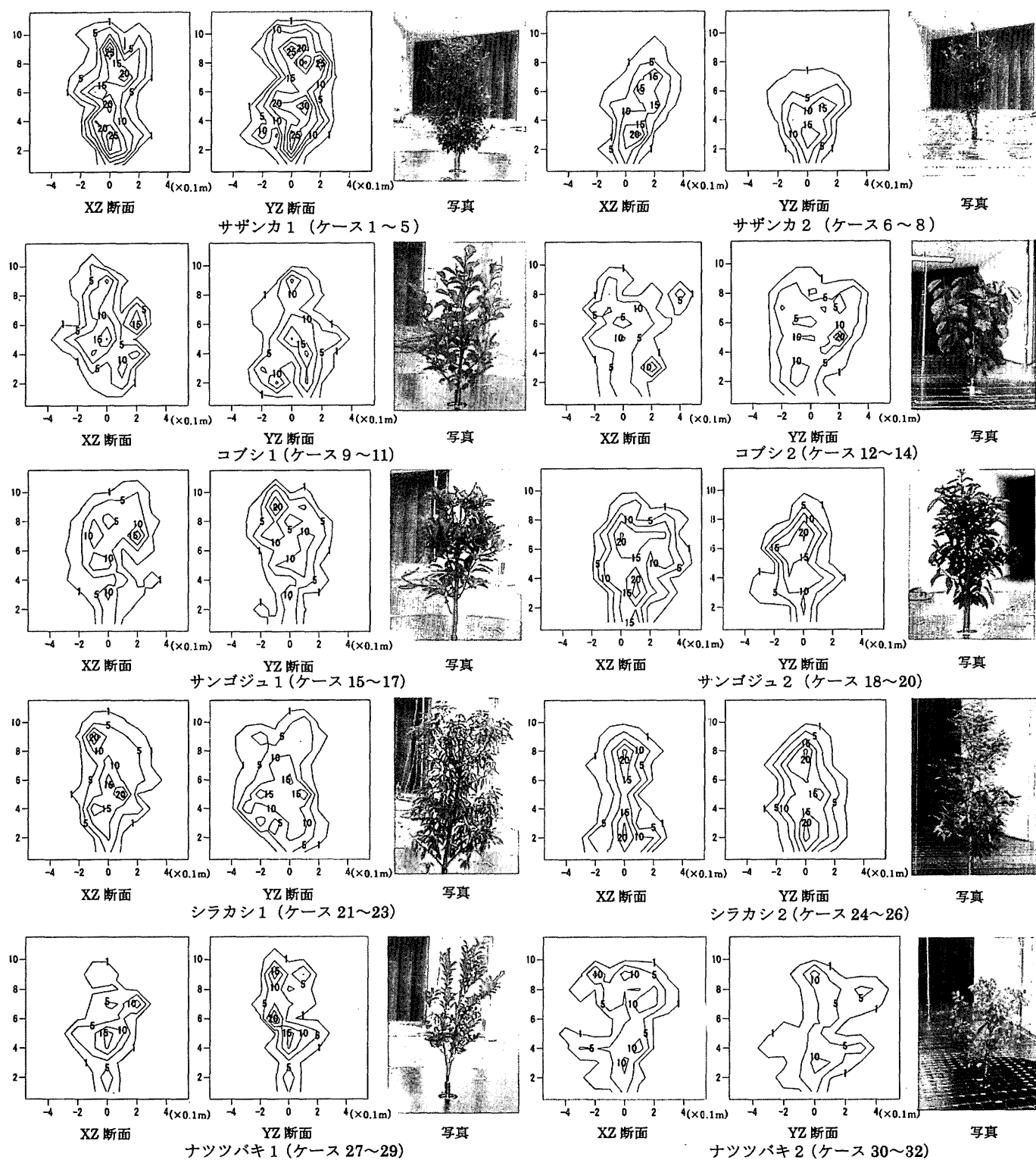
図3 抗力測定方法



メッシュ毎の葉の刈り取り

スキャナーによる葉面積測定

写真2 葉面積測定状況



図中の数字は葉面積密度 (m^2/m^3)

図4 樹種別葉面積密度分布

表3 樹種別樹木全体の葉面積密度

樹種	樹木体積(m^3)	全葉面積(m^2)	葉面積密度(m^2/m^3)	樹種	樹木体積(m^3)	全葉面積(m^2)	葉面積密度(m^2/m^3)
サザンカ1	0.173	1.32	7.60	シラカシ1	0.200	1.04	5.20
サザンカ2	0.112	0.60	5.34	シラカシ2	0.132	0.74	5.59
コブシ1	0.166	0.94	5.64	ナツツバキ1	0.095	0.50	5.22
コブシ2	0.183	1.05	5.73	ナツツバキ2	0.221	0.80	3.61
サンゴジュ1	0.190	0.86	4.54				
サンゴジュ2	0.150	1.07	7.10				

復が遅くなっている。

乱れ小が全体的に風速の回復が遅いのは樹木後流の乱れ成分が少なく、気流が攪拌されにくいからと考えられる。乱れ中、乱れ大が樹木の中段高さで回復が遅いのは、中段高さが葉の密集度が高いからであり、葉の局所的分布が気流性状に与える影響が大きいためである。

②樹種別の比較

葉の大きさ、付き方の異なるサザンカ1、コブシ1、ナツツバキ1の3樹種について樹種の違いによる風速分布の比較を行った。図7に樹木中心における流れ方向の風速分布を示した。葉の密度が高いZ=200~800mmでの値を高さ平均すると樹木の風下直後の風速比についてはサザンカが約0.4、コブシが約0.5、ナツツバキが約0.8と葉面積の大きさに比例して風速が減少している。図8に樹木中心における鉛直方向の風速分布を示した。葉面積の小さいナツツバキは樹木の風下2000mmで風速が回復しているが、サザンカ、コブシは風速の回復に4000mmを要している。

樹木の風下の風速分布に関しては葉面積密度より絶対的な葉の量である葉面積の影響が大きいためである。

4.3 抵抗係数算出結果

表4に樹種別、実験気流別の抵抗係数を示した。

①乱れ性状の違いによる変化

乱れが少ないほど抗力が大きくなっているが、樹木にあたる風速

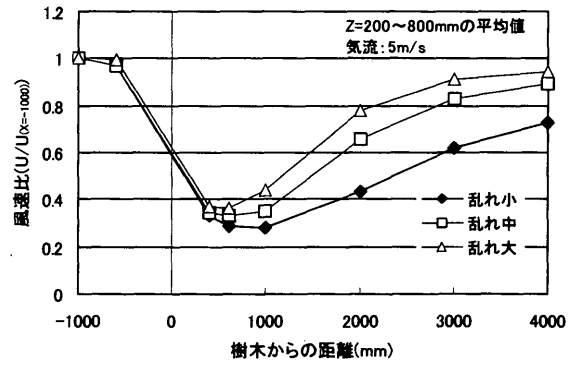


図5 乱れ性状別流れ方向風速分布

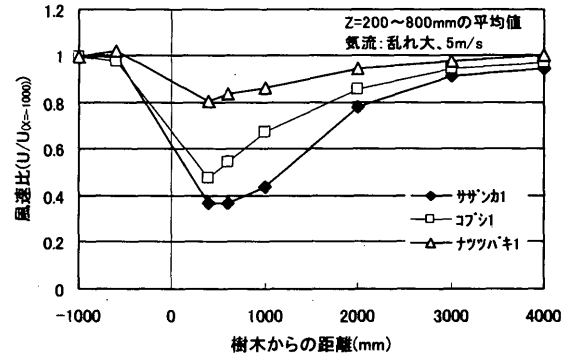


図7 樹種別流れ方向風速分布

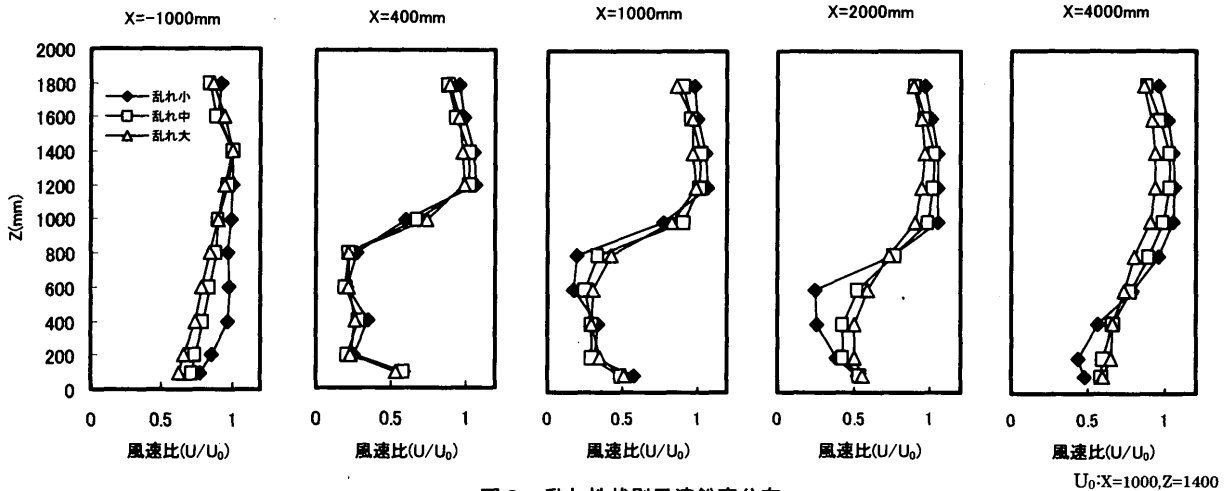


図6 乱れ性状別風速鉛直分布

U₀:X=1000,Z=1400

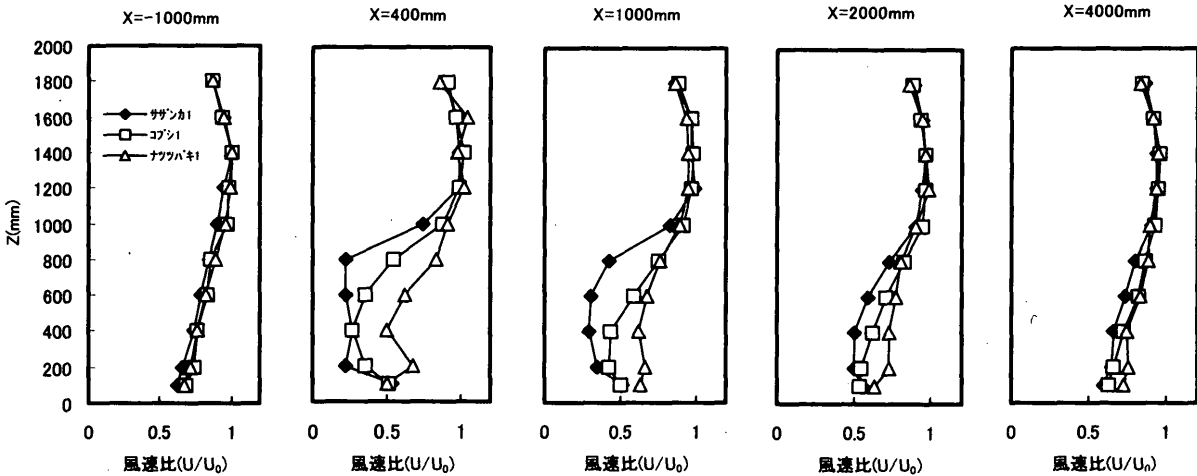


図8 樹種別風速鉛直分布

U₀:X=1000,Z=1400

が高いことも要因の1つとして挙げられる。実験気流の作成段階で乱れを変化させると同時に平均風速の鉛直分布も変化しているため、乱れによる差異を純粹に評価することはできないが、抗力、風速から抵抗係数を逆算すると乱れ大が0.43と最も大きな値となり、乱れが大きいほど抵抗係数は高くなった。しかし、乱れ性状による抵抗係数の差は10%以内である。

②樹種および風速の違いによる変化

風速 3m/s ではサザンカが抵抗係数 0.4 と小さく、ナツツバキが抵抗係数 0.66 と大きい結果となった。その他の樹種は風速に関係なく抵抗係数 0.5 前後であった。風速の上昇に伴いナツツバキの抵抗係数が 0.66 から 0.48 に変化した。これはナツツバキが風に対して変形しやすいため抵抗係数が減少したと考えられる。その他の樹種も風による変形が少ないサザンカを除いて、風速が上昇すると抵抗係数が若干小さくなる傾向がある。

葉面積密度と抵抗係数の関係を図9に示した。サンゴジュやシラカシは樹木全体の葉面積密度が高くなると抵抗係数が大きくなる傾向がある。

③抵抗係数算出方法の違いによる比較

見付面積を代表面積として算出した抵抗係数（以下、見付面積ベース）と葉面積密度を代表面積として算出した抵抗係数（以下、葉面積ベース）の比較を表5、図10に示した。サザンカ1、サンゴジュ1、シラカシ1は見付面積ベースの抵抗係数が0.2~0.3大きい結果となった。コブシ1やナツツバキ1は抵抗係数の差が少なかった。これは風の流れに対して奥行きが大きい樹種は抵抗係数の差が大きく、奥行きが小さい樹種に対しては抵抗係数の差が少なくなったものと考えられる。

6. まとめ

実物の樹木を使った風洞実験を行い樹種別の葉面積密度の測定、葉面積密度を代表面積とした抵抗係数の算出を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1)葉面積密度の空間分布については個体差が大きく、定量的に把握するのは困難であるが、各樹種とも最も密集している場所の葉面積密度は 20~25(m²/m³)であった。
- (2)樹木の風下の風速分布に関しては樹木全体の葉面積密度より絶対的な葉の量である葉面積の大きさとその局所的分布の影響が大きい。
- (3)風による変形が大きい葉を有する樹種は、風速の上昇に伴い抵抗係数が小さくなる傾向がある。
- (4)サンゴジュ、シラカシについては樹木全体の葉面積密度と抵抗係数には概ね相関関係にある。極端に葉が密集している樹種や葉と葉の隙間が大きい樹種は相関関係が成り立たない。抵抗係数の範囲は0.5を中心に±0.3の範囲であった。
- (5)風の流れに対して葉の奥行きが大きい樹種の抵抗係数は葉面積ベースに比べ、見付面積ベースの抵抗係数が大きくなる。葉の奥行きが小さい樹種については両者の抵抗係数の差は少ない。

7. おわりに

樹木の葉の分布を3次元で表現し、葉面積密度を代表面積とした

表4 樹種別実験気流別抵抗係数

	実験気流	風速3m/s			風速5m/s			風速7m/s		
		抗力(N)	葉面積密度(m ² /m ³)	抵抗係数	抗力(N)	葉面積密度(m ² /m ³)	抵抗係数	抗力(N)	葉面積密度(m ² /m ³)	抵抗係数
サザンカ1	乱れ小	-	-	-	4.34	7.60	0.39	-	-	-
サザンカ1	乱れ中	-	-	-	3.50	7.60	0.40	-	-	-
サザンカ1	乱れ大	1.00	7.60	0.40	2.87	7.60	0.43	5.74	7.60	0.46
サザンカ2	乱れ大	-	-	-	1.34	5.34	0.50	-	-	-
コブシ1	乱れ大	0.99	5.64	0.54	2.59	5.64	0.48	4.54	5.64	0.51
コブシ2	乱れ大	-	-	-	3.13	5.73	0.78	-	-	-
サンゴジュ1	乱れ大	0.64	4.54	0.50	1.95	4.54	0.45	3.97	4.54	0.42
サンゴジュ2	乱れ大	-	-	-	2.73	7.10	0.67	-	-	-
シラカシ1	乱れ大	1.08	5.20	0.59	2.79	5.20	0.48	5.21	5.20	0.49
シラカシ2	乱れ大	-	-	-	1.66	5.59	0.59	-	-	-
ナツツバキ1	乱れ大	0.59	5.22	0.66	1.48	5.22	0.55	2.46	5.22	0.48
ナツツバキ2	乱れ大	-	-	-	2.15	3.61	0.63	-	-	-

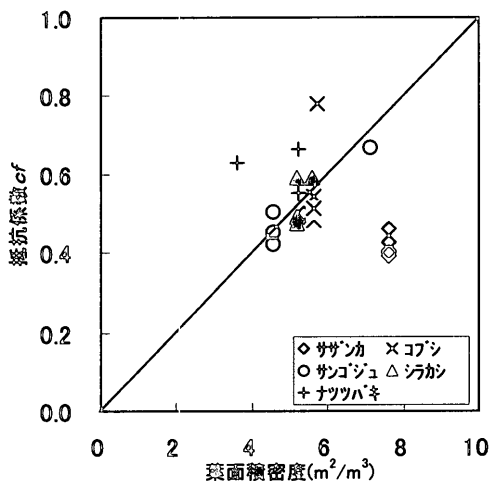


図9 葉面積密度と抵抗係数の関係

表5 代表面積の違いによる抵抗係数

	風速3m/s		風速5m/s		風速7m/s	
	見付面積ベース	葉面積ベース	見付面積ベース	葉面積ベース	見付面積ベース	葉面積ベース
サザンカ1	0.71	0.40	0.73	0.43	0.80	0.46
コブシ1	0.42	0.54	0.38	0.48	0.35	0.51
サンゴジュ1	0.70	0.50	0.72	0.45	0.79	0.42
シラカシ1	0.77	0.59	0.67	0.48	0.68	0.49
ナツツバキ1	0.75	0.66	0.63	0.55	0.58	0.48

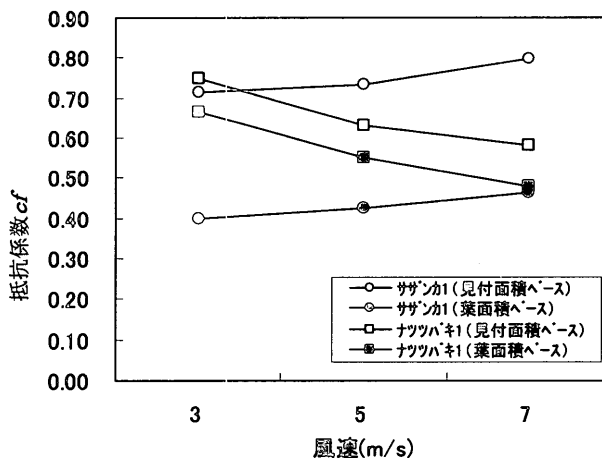


図10 風速の違いによる抵抗係数の変化

抵抗係数を数値シミュレーションに適用することで、枝の広がりや局所的分布を考慮した樹木まわりの気流分布を予測することが可能となる。課題として実験本数を増やし抵抗係数や葉面積密度データの蓄積を図ることが挙げられる。今後は数値シミュレーションへの適用について報告していきたい。

8. 謝辞

本研究は建設省建築研究所(当時)を中心とした共同研究である「屋外空間の熱環境設計研究委員会」での活動の一環として行われたものである。ご協力いただいた関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 梅千野晃,八木澄夫,木村剛久:建物外部空間における植栽の熱環境形成に及ぼす効果(その1)夏季・晴天日における熱環境の実測調査,日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学)pp.935~936,1988
- 2) 八木澄夫,梅千野晃,木村剛久:建物外部空間における植栽の熱環境形成に及ぼす効果(その2)主成分分析による植栽空間の位置づけ,日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学)pp.937~938,1988
- 3) Robert F. White: Effect of Landscape Development on the Natural Ventilation of Buildings and Their Adjacent Areas, Texas Engineering Experiment Station, Research Report 45 1945
- 4) Kondo, J. and Akashi, S.: Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, Boundary-Layer Meteorol 10 1976
- 5) 佐藤隆光,高橋英紀:防風林周辺の風の流れと温度分布に関する数値シミュレーション,農業気象 53(4)pp.275~283,1997
- 6) 出口清考,村上周三他:実物樹木の防風効果に関する風洞実験,日本建築学会関東支部研究報告集 pp.21~28,1980
- 7) 神山健二,成田健一,大橋征幹:樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その3 葉面積密度と抵抗係数の関係,日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 D-2)pp.667~668,2000

(2003年7月10日原稿受理, 2003年12月22日採用決定)