単独樹木周辺の気流解析に関する研究

A STUDY ON ANALYSIS OF AIRFLOW AROUND AN INDIVIDUAL TREE

大橋 征幹*

Masamiki OHASHI

The purpose of this study is to predict the influence of trees on airflow around buildings by using CFD. In order to analyze the airflow around and through trees, the modeling of the aerodynamic effect of trees is required. Many plant canopy turbulence models have been developed in the past study of dendrology and agricultural meteorology. Almost all the models, however, were examined under horizontally homogeneous conditions. Using one- or two-dimensional computational domains, they have been developed for plant fields (e.g. corn fields, coniferous forests). In this study, airflow caused by an individual tree is estimated through three-dimensional calculations on these above models. The calculated airflow, compared with results of the wind-tunnel experiment, shows usefulness and limitations of the models, allowing for improvement of the model for analysis of airflow around an individual tree.

Keywords: CFD, Turbulence model, Tree, Canopy, Wind-tunnel experiment

数値流体力学, 乱流モデル, 樹木, キャノピー, 風洞実験

1. はじめに

身近な自然環境の代表である緑は、安全で快適な居住環境を創り出すための道具として様々な目的で活用されている。

樹木は風の調節に対して適した特徴を持っている。樹木を計画的に配置することによって、建物周辺の風環境を調節することができる。樹木は防風林やビル風問題の対策として用いられるように風速低減効果を期待されることが多く、既往の研究^{2)~4)}では、見付面積とその遮蔽率によって樹木の形状が表現され、実験的にその効果が明らかにされてきた。しかし、樹木の影響をモデル表現することにより、建物と樹木の組み合わせにより形成される風環境を数値計算によって予測することが可能となる。樹木の気流に対する性状のモデル化については森林や農業気象の分野を中心に植物キャノピー層を対象とした乱流モデルの研究がある。植物キャノピー乱流モデルでは一般に抵抗係数を決める際の代表面積として葉面積密度を用いる。樹種の違いは抵抗係数と葉面積密度の分布により表現される。主に畑や森林などを対象とするこれらの研究では、対象とする場を水平方向に一樣とみなし、その多くが1次元で検討されてきた。そのため、葉面積密度は高さ方向に分布を持った1次元のプロファイルで与えられる。乱流モデルとしては2次元、3次元の対応を検討されている場合でも、キャノピー層を対象としているため計算領域

の形状はほとんどが2次元以下に設定されている。

一方、建物周辺気流の解析において建物近傍に配置される単独の樹木を建物と同レベルで表現するためには、その樹冠内部の立体的な構造を明らかにし、葉面積密度の3次元空間分布を把握する必要がある。植物キャノピー層を対象とした研究では、このように細かく不連続な3次元的分布を持つ葉面積密度を与えた場合の検討はなされておらず、単独樹木を対象とした場合のモデルの有効性も十分な確認がされていない。

本研究では、建物周辺の風環境に対する樹木の影響を数値シミュレーションによって検討することを可能とするために、樹木の風に対する抵抗のモデル表現について検討する。森林や畑を対象に開発されている植物キャノピー乱流モデルを、独立した単独の樹木に用いた場合の有効性を検証し、これまでに提案されている種々のモデルの特徴を明らかにする。また、これらのモデルの改良点について検討を加え、単独の樹木に適したモデルを提案する。

2. 風洞実験

実物の樹木を用いた風洞実験を行い、モデル比較・検証のためのデータを取得した。実験に用いる樹種はサザンカとし、高さ約1.2mの低木の頂部付近の枝を直径10mmのアルミ製支柱に固定して試験

本論文の一部は既に文1)に発表している。

* 国土交通省国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT

図1 試験体(サザンカ)

図2 風洞内の設置状況

図3 流入プロファイル

図5 葉面積密度分布

図4 平均風速分布

体を作成した。(図1)

実験に使用した風洞(図2:建築研究所乱流境界層風洞)の断面は幅3.0m高さ2.5mであり、スパイアーとラフネスブロック(高さ5cm)により基準高さ h (=試験体高さ0.6m)で約15%の乱れ強さを持つ流入プロファイルを作成した(図3)。スパイアーから試験体までの距離は15mである。風洞内の座標系は、主流方向を x 、その直交方向を y とし、高さ方向を z とする。また、それぞれの風速成分を u 、 v 、 w とする。

風速の測定には、X型熱線流速計(Dantec 55P61)を用い、サンプリング周波数1kHzで30秒間測定し平均風速を求めた。また、プローブを90度回転し u 、 v 成分と u 、 w 成分の2回に分けて測定することによって、各成分の乱れを計測した。

風速の測定点は、樹木中心($y_0: y=0$)を通る x - z 断面上の185点を設定した。測定した平均風速ベクトルを図4に示す。

葉面積密度 a の分布は、風速測定後に5cmメッシュの計算セル単位で葉を刈り取って測定した。葉面積には葉のみでなく枝の部分もその表面積の1/2を含めた。風速測定断面の a の分布を図5に示す。

3. 植物キャノピー乱流モデル

植物キャノピー気流の数値計算は、Wilson, N.R. & Shaw, R.H.⁵⁾やRaupach, M.R. & Shaw, R.H.⁶⁾、Yamada, T.⁷⁾などの多方程式モデルによる検討により本格的な研究が行われるようになってきた。

平岡ら⁸⁾は、植物群落や都市の建物群を対象とした3次元乱流

モデルを開発し k - ϵ モデルと応力方程式モデルで示した。平岡らの k - ϵ モデルでは、 ϵ 式に与える抵抗物体(建物や樹木)による乱れへの影響が、 a の関数で与えられている。これは、従来植物乱流モデルで一般的に用いられてきた k 収支の局所平衡の仮定によるモデルと大きく異なる。平岡ら⁹⁾は、Shaw, R.H. et al.¹⁰⁾の実験及びWilson, J.D.¹¹⁾の実験データとの比較によりこのモデルの有効性を示した。

Uno, I. et al.¹²⁾は、Yamada, T.の k - kl モデルを k - ϵ モデルに変換して都市キャノピー層の解析を行った。また、Svensson, U. & Häggkvist, K.¹³⁾も、Uno, I. et al.と同様のモデルを提案している。

Green, S.R.¹⁴⁾は、Wilson, J.D.を元にキャノピー内部における特異なエネルギー収支の過程を考慮し、葉による乱れの消散項を加えたモデルを提案した。Green, S.R.は、このモデルにより2次元計算を行い、森林模型による風洞実験とよく一致することを確認した。

Liu, J. et al.¹⁵⁾は、森林の微気象を予測する目的でGreen, S.R.のモデルを用いて林縁部の2次元シミュレーションを行った。Liu, J. et al.は模型による実験データとの比較によりGreen, S.R.の式の係数を補正した。

4. モデル基礎式

標準 k - ϵ モデルをベースに前述の植物キャノピー乱流モデルの基礎式を表1にまとめ、各モデルについてその違いを示す。なお、平岡らは抵抗物体の体積変化を考慮して有効体積率を与えているが、ここでは、枝葉による体積変化は少ないとみなしこれを無視する。

また、改良モデルについては後述する。

樹木に働く力は抗力のみを考え、抵抗係数 C_f の代表面積を a とすると葉群による単位体積あたりの抗力 F_i は (10) 式で表される。平均流の式にこの抗力項を加え、(5) 式が得られる。

k の輸送方程式は、各モデルを (6) 式のようにまとめることができる。表中の係数については、それぞれのモデルに応じた値が与えられる。また、平岡らの式のみ乱流拡散項に補正係数 C_{p1e} が与えられる。Green, S.R. の式には葉の影響が乱れのエネルギー収支に対して生成のほかに消散のために作用するとして L_k が追加される。 L_k は、Green, S.R. と Liu, J. et al. の式に与えられる。

ε の輸送方程式は (7) 式のように表される。 F_e は、平岡らのモデルを除いて (6) の式の F_k との平衡を仮定して与えられる。

Uno, I. et al. は Yamada, T. のモデルを次の関係式を用いて変換した。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{3}{2} \varepsilon \frac{\partial k}{\partial t} - \frac{\varepsilon}{L} \frac{\partial L}{\partial t} \quad (1)$$

において、

$$\frac{\partial L}{\partial t} \approx 0 \quad (2)$$

この仮定により C_{p1e} は 1.5 とされる。一方、Svensson, U. & Häggkvist, K. は、実験データとの比較から最適な C_{p1e} を 1.95 とした。

Green, S.R. のモデルでは k の式の L_k に応じた L_e が付加される。Liu et al. はこの L_e の係数 C_{p2e} を数値計算の結果から補正している。

平岡らは、村上ら^{16),17)}のモデル化に従い抵抗物体による ε の生成項を次式でモデル化した。

$$F_e = \frac{k^{3/2}}{L} \quad (3)$$

ここで葉による渦の特徴長さスケール L については a の逆数で与えられる。

5. 計算条件

葉面積密度を代表面積とした場合のサザンカの抵抗係数について

表1 k- ε 植物キャノピー乱流モデル基礎式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_i \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \right) - F_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_i} C_{\pi} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + S - \varepsilon + F_k - L_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1e} S - C_{2e} \varepsilon + C_{p1e} F_e - C_{p2e} L_e) \quad (7)$$

$$S = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\nu_i = C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$F_i = C_f a U_i \sqrt{U_i^2} \quad (10)$$

$$F_k = U_j F_j \quad (11)$$

$$L_k = 4 C_f a \sqrt{U_j^2} k \quad (12)$$

$$C_D = 0.09, \sigma_i = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{1e} = 1.44, C_{2e} = 1.92$$

	C_{π}	L_k	C_{p1e}	F_e	C_{p2e}	L_e
Uno, I. et al.	—	—	1.5	F_k	—	—
Svensson & Häggkvist	—	—	1.95	F_k	—	—
Green, S. R.	—	(12) 式	1.5	F_k	1.5	L_k
Liu, J. et al.	—	(12) 式	1.5	F_k	0.6	L_k
平岡ら	1.0	—	2.5*	$ak^{3/2}$	—	—
改良モデル	—	(12) 式	2.5	$ak^{3/2}$	—	—

* 今回求めた最適値。平岡らの検討では、植物で 0.8 ~ 1.2、都市で 10.0 程度。

は、筆者らの実験¹⁸⁾により $C_f=0.275$ ((10) 式での表記上、 C_f に 1/2 を含めた場合) という結果が得られている。ここでは $C_f=0.3$ とした。

計算領域を図6に示す。メッシュ幅は x 、 y 、 z 方向とも全域で 1/12h とした。

図6 計算領域

数値解法には ABMAC 法を用いた。空間差分には QUICK スキーム、時間差分は Adams-Bashforth スキームを使用した。

流入条件、境界条件を表2に示す。

表2 境界条件

流入面	u, k: 実験値の分布を与える。 $v=0, w=0$ $\varepsilon(z) = \frac{C_D^{3/4} k(z)^{3/2}}{K z}$
流出面	$u, v, w, k, \varepsilon : \frac{\partial}{\partial x} = 0$
上面	$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, v=0, w=0, \frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
床面	u, v : べき乗則 $u_{z1} = (1 - 2\alpha) u_\alpha, \alpha = 1/4$ $\frac{\partial k}{\partial z} = 0, \varepsilon_{z1} = \frac{C_D^{3/4} k_{z1}^{3/2}}{K h_{z1}}$

K : カルマン定数 (=0.4), u_{z-1} : 床面内仮想セルの風速, u_{z1} : 床面第1セルの風速,

ε_{z1} : 床面第1セルの ε , k_{z1} : 床面第1セルの k , h_{z1} : 床面から床面第1セル中心までの距離

6. モデル定数の確認

各モデルの係数の最適値を、今回行った風洞実験データとの比較から確認した。

Yamada, T. をベースとした Uno, I. et al. によるモデル (= Svensson, U. & Häggkvist, K.) で C_{p1e} を変化した場合の平均風速及び乱流エネルギーの計算結果を図7、8に示す。Uno, I. et al. のモデルでは、樹冠上部付近で実験との対応が悪い傾向が見られた。 $x=0.5h \sim 0.75h$ での平均風速は実験データにほぼ一致した。乱流エネルギーは、実験データに比較して樹冠直後の $x=0.5h$ では大きくなり、 $x=2.42h$ では小さくなっている。Svensson, U. & Häggkvist, K. の求めた最適値 $C_{p1e}=1.95$ では、平均風速は $x=1.0h$ 以降で実験データよりも風速回復までの距離が短く、乱流エネルギーのプロファイルも大きく異なり今回の実験データには一致しなかった。

Green, S.R. 及び Liu, J. et al. のモデルによる実験データとの比較を図9、10に示す。Green, S.R. のモデルは Uno, I. et al. に L_k 、

図7 平均風速の比較 ●: 風洞実験 □: Uno, I. et al. ×: Svensson & Häggkvist

図8 乱流エネルギーの比較 ●: 風洞実験 □: Uno, I. et al. ×: Svensson & Häggkvist

図9 平均風速の比較 ●: 風洞実験 ◇: Green, S.R. △: Liu, J. et al.

図10 乱流エネルギーの比較 ●: 風洞実験 ◇: Green, S.R. △: Liu, J. et al.

図11 平均風速の比較 ●: 風洞実験 平岡ら (+: $C_{pie}=1.5$ ▽: $C_{pie}=2.0$ ○: $C_{pie}=2.5$ △: $C_{pie}=3.0$)

図12 乱流エネルギーの比較 ●: 風洞実験 平岡ら (+: $C_{pie}=1.5$ ▽: $C_{pie}=2.0$ ○: $C_{pie}=2.5$ △: $C_{pie}=3.0$)

図 13 平均風速の比較 ●: 風洞実験 ◇: Green, S.R. ○: 平岡ら ($C_{ple}=2.5$) 太線: 改良モデル

図 14 乱流エネルギーの比較 ●: 風洞実験 ◇: Green, S.R. ○: 平岡ら ($C_{ple}=2.5$) 太線: 改良モデル

L_e を加えたものであるが、平均風速の分布はUno, I. et al. のモデルよりも実験に近い結果が得られた。乱流エネルギーの分布についても改善が見られ、実験データにより近づいた結果となった。しかし、Liu, J. et al. の行った C_{ple} の補正を与えると実験データとの対応は極端に悪くなった。

平岡らのモデルの最適な C_{ple} は、平岡らの検討⁹⁾では植物群落の場合 0.8 ~ 1.2 程度、建物群の場合 10 程度と報告されている。平岡らのモデルについて、 C_{ple} の値を変化させて実験値との対応を確認した。 C_r は 1.0 とした。計算結果を図 11、12 に示す。図 11 を見ると $C_{ple}=1.5$ 程度では十分な風速減少が見られなかったが 2.0 を超えると 3.0 まで実験データにほぼ一致した。また、図 12 の k の値も $C_{ple}=1.5$ の場合のみ極端に大きいが、2.0 ~ 3.0 では安定して変化している。今回の実験データとの比較では、 $C_{ple}=2.5$ 程度が最適値となった。平岡らのモデルによる k の分布の特徴として、樹冠上下端の高さでは過大となるが、樹冠部分の高さに相当する 0.6 ~ 0.8 h 付近では他のモデルで見られた過大評価が抑えられた結果となった。

7. モデルの比較結果

今回の検討では、Green, S.R. のモデルと平岡らのモデルが実験データに良く一致した。Uno, I. et al. のモデルは平均流については十分な結果が得られたが、 $x=1.5h$ 以降の高さ $z/h=0.5 \sim 1.0$ 付近で実験データとの差がやや大きい。Green, S.R. のモデルは L_k, L_e により樹冠部分での k の過大評価も多少抑えることができた。Liu, J. et al. の行った補正は今回の実験データには不要であった。平岡らのモデルの係数 C_{ple} は 2.0 ~ 3.0 の範囲で比較的安定して平均流を求めることができた。

8. 改良モデル

乱流エネルギーの分布を精度良く求めるために、Green, S.R. の用いた (6) 式の L_k が有効であることが確認できた。これは、Shaw, R.H. & Seginer, I.¹⁹⁾ によって示されたキャノピー内の乱れ

の収支のフレームワークの提案に基づいたものであり、樹冠内部では葉の影響により低周波から高周波へのエネルギーカスケードの過程が短絡され、結果として k の散逸が促進されるものとして実験データを根拠に考え出されたものである。Green, S.R. はこの項が樹冠内の k の収支に対して重要であると判断して、Wilson, J.D.¹⁰⁾ に従い k の消散項として L_k をモデル化した。

また、平岡らは独自の方法で F_e をモデル化し、樹冠部分での k の増大を押さえることに成功している。

これらの結果を踏まえ、ここで単独の樹木により適したモデルについて考える。 k の式には樹冠の影響を表す項として (11) 式の F_k を与え、さらに Green, S.R. に従い L_k を付加することによって樹冠内の k の収支を調節する。 ε の式は (3) 式の平岡らのモデル化に従って F_e を定義する。 $C_{ple}=2.5$ として、以上をまとめると表 1 の改良モデルのように表される。これは、平岡らのモデルで C_r を 1.0 として L_k を付加したものに等しい。この改良モデルによる計算結果を Green, S.R.、平岡らのモデルによる結果とともに図 13、14 に示す。この結果から平岡らの k の式に L_k を加えることにより $x=0.5h$ での $z/h=0.5$ および $z/h=1.0$ 付近の樹冠上下端高さに見られる k の増大が Green, S.R. 程度にまで抑えられ、平均流の分布も実験値に一致することが確認できる。平岡らのモデルにおいてもこの項は有効であり、この改良モデルによる結果が今回最も精度の良いものとなった。

9. おわりに

樹冠内部の乱れの収支は非常に微妙なバランスの上に成り立っていると考えられる。Svensson, U. & Häggkvist, K. や Liu, J. et al. の既往の検討でも、それぞれ Uno, I. et al. や Green, S.R. と同様のモデルを用いていながらも係数にばらつきが生じている。平岡²⁰⁾ は 4 タイプの RANS 型乱流モデルに、ここで取り上げた様々なタイプの植物のモデルを組み込み 2 つの植物キャノピー層の実験データと比較しているが、その 1 次元計算でも実験データとの組み合わせによって最適となる係数の値が異なることが報告されている。

今回の検討により単独樹木に対する様々な植物キャノピー乱流モデルの有効性や限界を示した。しかし、それらのモデル定数の普遍的な有効範囲を確定するには不十分であり、さらなる検討を必要とする。今回得られた知見を以下にまとめる。

- (a) 様々な植物キャノピー乱流モデルを用いて風洞実験データとの比較により単独樹木への適用性について確認した。その結果、平均流に関しては Uno, I. et al., Green, S.R., および平岡らのモデルが実験データに比較的良く一致した。
- (b) Green, S.R. のモデルは L_k , L_ε を付加することにより Uno, I. et al. よりも実験とよく一致した。
- (c) 平岡らのモデルの場合、 ε 式の F_ε のモデル化が他と異なるが、 C_{p1e} にある程度の大きさ（今回の検討では 2.0 以上）を与えることにより比較的安定した結果が得られることを確認した。
- (d) 平岡らのモデルに L_k を付加した改良モデルにより、より精度を高めることができることを示した。

記号

x_i : 空間座標の 3 成分、 U_i : 風速の 3 成分、 l : 乱れの長さスケール、 k : 乱流エネルギー、 ε : 乱流エネルギー消散率、 P : 圧力、 ρ : 密度、 ν_i : 渦動粘性係数、 L : 葉による乱れの特徴長さスケール、 a : 葉面積密度

参考文献

- 1) 大橋征幹: 植物キャノピー乱流モデルの改良, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-2), pp.653-654, 2002.8
- 2) 勝田高司, 村上周三, 杉山伸一, 上原清: 防風林 (垣) の性能に関する風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (計画系), pp.185-186, 1973.10
- 3) 出口清孝, 村上周三, 高橋岳夫: 実物樹木の防風効果に関する風洞実験 (その 1) 単体並びに樹木列の防風効果について, 日本建築学会関東支部研究報告集 (計画系), pp.21-24, 1984.7
- 4) 出口清孝, 村上周三, 高橋岳夫: 実物樹木の防風効果に関する風洞実験 (その 2) 高木と低木の組み合わせ植栽の防風効果と樹木に加わる風圧力について, 日本建築学会関東支部研究報告集 (計画系), pp.25-28, 1984.7
- 5) Wilson, N.R. and Shaw, R.H. : A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, J. Appl. Meteorol., Vol.16, pp.1197-1205, 1977.11
- 6) Raupach, M. R. and Shaw, R. H. : An Averaging Procedure for Flow within Vegetation Canopies, Boundary-layer Meteorol., Vol.22, pp.79-90, 1982
- 7) Yamada, T. : A Numerical Model Study of Turbulence Airflow in and above a Forest Canopy, J. Meteorol. Soc. Japan, Vol.60, pp.439-454, 1982.2
- 8) 平岡久司, 丸山敬, 中村泰人, 桂順治: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究 (その 1) 乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文報告集, No.406, pp.1-9, 1989.12
- 9) 平岡久司, 丸山敬, 中村泰人, 桂順治: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究 (その 2) 実験データとの比較によるモデルの検証, 日本建築学会計画系論文報告集, No.416, pp.1-8, 1990.10
- 10) Show, R.H., den Hartog, G., King, K.M. and Thurtell, G.W. : Measurements of Mean Wind Flow and Three-dimensional Turbulence Intensity within a mature Corn Canopy, Agric. Meteorol., Vol.13, pp.419-425, 1974
- 11) Wilson, J.D. : A Second-order Closure Model for Flow through Vegetation, Boundary-Layer Meteorol., Vol.42, pp.371-392, 1988
- 12) Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S. : Numerical Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer, Boundary-Layer Meteorol., Vol.49, pp.77-98, 1989
- 13) Svensson, U. & Häggkvist, K. : A Two-equation Turbulence Model for Canopy Flows, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.35, pp.201-211, 1990
- 14) Green, S.R. : Modeling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely-spaced Trees., PHOENICS J. Comp. Fluid Dyn. and Applic., Vol.5, No.3, pp.294-312, 1992.7
- 15) Liu, J., Chen, J.M., Black, T.A. and Novak, M.D. : $E-\varepsilon$ Modeling of Turbulent Air Flow Downwind of a Model Forest Edge, Boundary-Layer Meteorol., Vol.77, pp.21-44, 1996
- 16) 村上周三, 加藤信介, B.E. ロンダー, 鈴木啓泰: 層流型クリーンルーム内の気流性状・汚染物拡散性状に関する研究 (その 6) 床グレーチング通風抵抗を考慮した新しい $k-\varepsilon$ 型乱流モデルの提案, 生産研究, vol.40, No.1, pp.67-70, 1988.1
- 17) 鈴木啓泰, 村上周三, 加藤信介, B.E. ロンダー: 層流型クリーンルーム内の気流性状・汚染物拡散性状に関する研究 (その 7) グレーチング圧力損失の k , ε への影響を考慮した改良型 2 方程式モデル, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.717-720, 1988.9
- 18) 大橋征幹, 神山健二, 成田健一: 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その 2 抵抗係数の算出と数値シミュレーション, 日本建築学会学術講演梗概集 (D-2), pp.523-524, 1999.9
- 19) Shaw, R.H. and Segner, I. : The Dissipation of Turbulence in Plant Canopies, 7th Symp. American Meteorol. Society on Turbulence and Diffusion, pp.200-203, 1985.11
- 20) 平岡久司: 植物キャノピー乱流モデルの比較, 第 16 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, B26-1, pp.1-9, 2002.12

(2003年11月6日原稿受理, 2003年12月24日採用決定)