

樹木と建物の効果を考慮した新しい風況予測モデルの開発*

A generalized canopy model for wind resource assessments in forest and urban area

石原 孟**

榎木 康太***

山口 敦**

Takeshi ISHIHARA

Kota ENOKI

Atsushi YAMAGUCHI

1. はじめに

2007年3月末、日本における風力発電総設備容量は167万kWに達し、風力発電の普及が急速に進んでいる¹⁾。それに伴い、風力発電機は建物の影響を受ける臨海都市域や樹木の影響を受ける山岳地帯に建設されるケースが増えている。風力発電量は風速の3乗に比例するため、建物や樹木の影響²⁾を正確に評価できる風況予測モデルの開発が望まれている。

風力発電のための風況予測を行う際には樹木や建物を粗度としてモデル化するのが一般的である。このような粗度モデルでは、広域の流れ場を評価するには適しているが、風車近傍の樹木や建物の影響を正確に評価することができない。一方、建物近傍の風速場を正確に評価するには建物に沿って計算格子を作成し、数値流体解析により求めることが可能であるが、1つ1つの建物を再現するには膨大な計算格子数が必要となるため、広域な風況予測に適さない。そこで、建物や樹木の影響を抵抗力として運動方程式中にモデル化するキャノピーモデル³⁾⁴⁾が提案されてきたが、建物の割合(充填率)が高くなると、発散してしまう問題が残されている。従って、建物近傍の流れ場とその周辺の広域な流れ場を連続的に解析可能なキャノピーモデルの開発が望まれている。

そこで、本研究では樹木と建物のいずれにも適用可能な一般化キャノピーモデルを提案し、風洞実験や実測との比較によりモデルの予測精度を検証する。具体的には、まず多孔質媒体理論に基づいた一般化キャノピーモデルを提案する。次に、充填率が大きく異なる樹木と角柱および実都市を対象とした解析を行い、風洞実験と実測の結果と比較することにより、本研究で提案した一般化キャノピーモデルの有効性と予測精度を明らかにする。

2. 一般化キャノピーモデルの提案

2.1. 解析モデル

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT⁵⁾ (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) に建物や樹木の影響を抵抗力として取り入れ、式(1)に示す運動量保存則を用いた。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + F_{u,i} \quad (1)$$

ここで、 $F_{u,i}$ は樹木と建物の効果を表す抵抗力である。また $\bar{u}_i$ と u'_i は物理空間での i 方向の速度成分の平均値と変動値、 $\bar{p}$ は平均圧力、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数である。レイノルズ応力 $\rho \overline{u'_i u'_j}$ は線形渦粘性型モデルにより近似した。また、気流中の乱れは標準 $k-\varepsilon$ モデルにより評価した。乱流エネルギー k 及び乱流エネルギーの散逸率 ε は以下の輸送方程式より求める。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + F_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + F_\varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中の定数は標準 $k-\varepsilon$ モデルの値を用い、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $C_\mu=0.09$ とした。また、 F_k および F_ε は樹木と建物による乱流エネルギー k 及びその散逸率 ε の生成項を表す。

2.2. 新しいキャノピーモデルの提案

都市キャノピーモデル³⁾では建物が流体に与える抵抗力を抵抗係数 C_f 及び単位体積中流体体積当りの多孔質固体の表面積 a [m^{-1}]を用いて次のように表す。

$$F_{u,i} = -\frac{1}{2} \rho C_f a \sqrt{\bar{u}_j^2} \bar{u}_i \quad (5)$$

平岡ら³⁾のモデルでは、建物の体積を考慮しNS方程式の平均操作により、充填率が陽的に含まれる支配方程式を導出した。しかし、このモデルでは高い充填率の領域が存在する場合に発散してしまうという問題がある。本研究では都市群落内の建物を多孔質媒体としてモデル化し、建物の効果を抵抗力として考慮した。建物が都市内の流れに及ぼす抵抗力は、多孔質媒体が流れに及ぼす抵抗力と同様に、Burk-Plummerの式⁶⁾に基づきモデル化した。

$$F_{u,i} = -\frac{C_\rho}{D} \frac{\rho_r}{(1-\rho_r)^3} \sqrt{\bar{u}_j^2} \bar{u}_i \quad (6)$$

* 第30回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員, *** 非会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

ここで、 ρ は流体密度、 ρ_r は充填率である。 C は実験定数であり、通常 1.75 とするが、本研究では丸山⁴⁾の都市キャノピーに関する風洞実験結果により、定数 C を 1.225 とした。多孔質媒体の平均代表長さ $\bar{D}$ は、多孔質媒体の総体積 V_{Porous} と流体部分に接する総表面積 S_{Porous} を用いて $\bar{D} = C_S V_{\text{Porous}} / S_{\text{Porous}}$ と定義される。形状定数 C_S は球状多孔質媒体の場合に 6 である。ただし、Burk-Plummer の式では抵抗係数として球を仮定しているため、隙間のない建物の抵抗係数を表すには不適切である。そこで、本研究では建物を角柱で近似し、式(6)中のパラメータは次式により表した。

$$\rho_r = \frac{h S_B}{V}, \quad \bar{D} = \frac{C_S \rho_r V}{S_S} \quad (7)$$

ここで、 V は計算格子の体積、 S_B は計算格子内に存在する建物の占有面積（水平面積）、 h は建物の平均高さ、 S_S は建物が流体に接する部分の総面積である。建物を角柱で近似する場合には C_S が様々な値をとるが、本研究では建物を立方体で近似した場合の値 6 を用いた。

a が流体部分の体積 $(1 - \rho_r)V$ 当りの多孔質媒体固体表面積 S_S であることを考慮し、式(5)と式(6)の関係から

$$a = \frac{\rho_r}{(1 - \rho_r)} \frac{C_S}{\bar{D}}, \quad C_f = \frac{2C}{C_S (1 - \rho_r)^2} \quad (8)$$

を得る。一般的に都市群の抵抗係数 C_f は充填率が 20～30%付近で 3.0 程度⁴⁾の値をとるが、モデル式(8)では充填率が 100%に近づくにつれ、抵抗係数 C_f が無限大になってしまう。しかし、実際の都市では充填率が高くなると、都市内に循環流が生じ、抵抗係数 C_f も一定になる。都市内の流れのパターンの遷移は充填率 20～30%を境に生じるとされている⁷⁾。本研究では都市内の流れパターンの遷移を考慮し、抵抗係数を以下のようにモデル化した。

$$F_{u,i} = -\rho C_f' a' \sqrt{u_j^2} u_i, \quad C_f' = \min(C_f, 3.0), \quad a' = \frac{\rho_r}{(1 - \rho_r + \varepsilon)} \frac{C_S}{\bar{D}} \quad (9)$$

また充填率が 100%のとき、 a が無限大になることを防ぐために、定数 ε を導入し、 a の代わりに a' を用いた。本研究では定数 ε を 10^{-4} とした。この場合、充填率の高い流れ場は殆ど変化しないことを確認している。

一方、乱流エネルギーとその散逸率の生成項 F_k, F_ε は Green⁸⁾により提案された多孔質媒体によるエネルギーカスケードの促進過程を考慮した次式を用いた。

$$F_k = \beta_p \rho C_f' a' \sqrt{u_j^2}^3 - \beta_d \rho C_f' a' \sqrt{u_j^2} k \quad (10)$$

$$F_\varepsilon = C_{pe1} \beta_p \rho \frac{\varepsilon}{k} C_f' a' \sqrt{u_j^2}^3 - C_{pe2} \beta_d \rho C_f' a' \sqrt{u_j^2} \varepsilon \quad (11)$$

ここで、モデル定数 $\beta_p, C_{pe1}, C_{pe2}$ はそれぞれ 1.0, 1.5, 0.2 とした。 β_d に関しては通常 4.0 が用いられているが、充填率が高い場合に、 β_d は充填率 ρ_r の関数になることが予想される。高い充填率の格子内では式(10)の生成項と消散項が打ち消しあうと仮定すると、次式が得られる。

$$\beta_d = \left(\sqrt{u_j^2}^2 / k \right) \quad (12)$$

本研究では、 β_d と充填率 ρ_r の関係を求めるため、40%以上の高い充填率を有する建物に対する数値解析を行った。 β_d は充填率 ρ_r の増大に伴い指数関数的に減少すると仮定し、新たな定数 β_d' を定義し次式を提案する。

$$\beta_d' = C_{m1} \exp(-C_{m2} \rho_r) \quad (13)$$

解析結果から β_d' と充填率 ρ_r の関係を同定した。その結果 $C_{m1} = 68.0, C_{m2} = 9.1$ となることが分かった。最終的に β_d のモデルとして最大値を 4 とした次式を用いる。

$$\beta_d = \min(4.0, \beta_d') \quad (14)$$

図 1 には β_d と充填率 ρ_r の関係を示す。

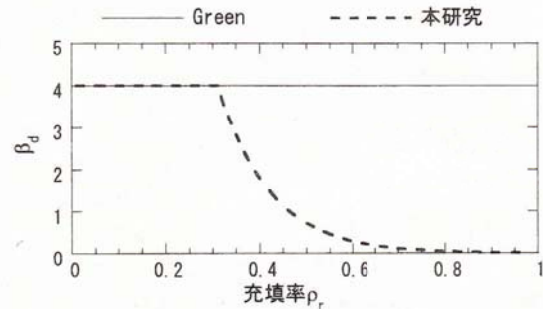


図 1 β_d と充填率 ρ_r の関係

次に本モデルと従来の植生キャノピーモデルとの関係を示す。一般的に植生キャノピーモデルでは植生による抵抗係数を次式により表す。

$$F_{u,i} = -\rho A C_{f,\text{tree}} \sqrt{u_j^2} u_i \quad (15)$$

$C_{f,\text{tree}}$ は樹木の抵抗係数、 A は葉面積密度 [m^{-1}] で樹冠体積 V に対する全葉面積 S_s の比である。葉面積密度は $A = S_s / V = C_S \rho_r / \bar{D}$ で表されるので、樹木の抵抗係数は式(6)と式(15)から次式により表せる。

$$C_{f,\text{tree}} = \frac{C}{C_S (1 - \rho_r)^3} \quad (16)$$

ただし、式(16)をそのまま用い変換すると、 $C_{f,\text{tree}} < C / C_S$ のとき、充填率 ρ_r が 0 より小さくなるため、本研究では充填率 ρ_r の最小値を 0.01 と設定した。その場合には葉面積密度 A を修正し、代表長さ $\bar{D}$ を求めることにより、等価的な抵抗係数を算出した。既存の植生キャノピーのパラメータ $C_{f,\text{tree}}, A$ が分かれば、本モデルに必要なパラメータ $\rho_r, \bar{D}$ は次式により求められる。

$$\rho_r = \max \left(0.01, 1.0 - \sqrt[3]{\frac{C}{C_{Sf, \text{tree}}}} \right), \quad \bar{D} = \frac{C_S \rho_r}{A'}, \quad (17)$$

where $A' = \begin{cases} A & (\rho_r > 0.01) \\ C_{f, \text{tree}} A / 0.21 & (\rho_r = 0.01) \end{cases}$

以上のように、本研究で提案したモデルは、抵抗体が計算格子に占める割合である充填率と格子内の抵抗体の代表長さにより、樹木や建物などの抵抗力を表せるため、一般化キャノピーモデルと呼ぶことができる。

3. 樹木及び角柱を対象とする解析と検証

本章では充填率が大きく異なる樹木及び角柱周辺の流れ場を解析し、実測と実験の結果と比較することによりモデルの検証を行う。図2には本研究で解析した樹木と観測塔の概要を示す⁹⁾。樹木の抵抗係数、葉面積密度はそれぞれ 0.8, 1.17¹⁰⁾であり、本モデルパラメータに式(17)を用いて換算すると、代表長さ $\bar{D}$ と充填率 ρ_r はそれぞれ 1.86 と 0.36 となる。 $z/H = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ の位置で測定された平均風速および乱流エネルギーと解析結果を図3に示す。値はそれぞれ樹木の高さにおける流入風(5.3m/s)及びその二乗値で無次元化されている。乱流エネルギーは $z/H = 3 \sim 5$ の後方領域で過小評価の傾向にあった。一方、風速は樹木による遮蔽効果を概ね再現できている。充填率が低い樹木のような植生にも本研究で提案した手法が適応可能であることを明らかにした。

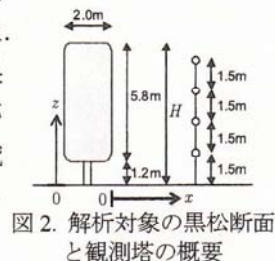


図2 解析対象の黒松断面と観測塔の概要

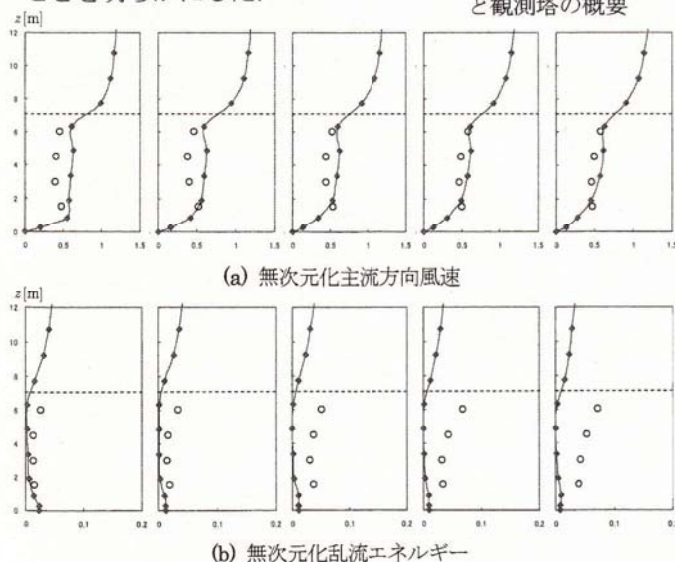


図3 樹木背後の流れ場の観測値と予測値との比較
○:観測値, ●:予測値, - - -:樹木高

次に図4に示した角柱周りの気流解析を行った。計算領域内で角柱が位置する格子には式(7)により充填率及び代表長さを求めた。図5には解析結果と風洞実験の結果を示す。各軸は角柱の幅 b で規格化してある。高

い充填率領域の風速はほぼ0である。後流領域では風速の過少評価が見られるものの、概ね実測値と一致している。複雑な計算格子を使用せず、本研究で提案したキャノピーモデルにより従来の気流解析手法と同程度の精度を有することが示された。

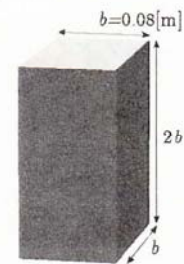


図4 解析対象の角柱

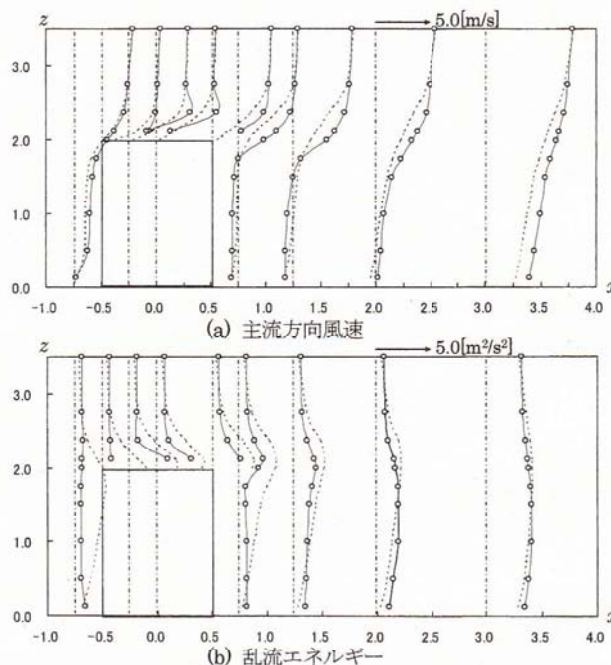


図5 角柱周り流れ場の測定値と予測値の比較 ($y/b = 0$ 平面)
○:観測値, - - -:予測値, ·····:各測定値の原点

4. 実都市を対象とする解析と検証

最後に実都市を対象とする気流解析を行い、石原ら¹²⁾により行われた風洞実験との比較検証を行った。

解析は宮古島地方気象台およびその周辺市街地を対象とした。標高には国土地理院数値地図 50m メッシュ、北海道地図(株)発行の 10m メッシュ標高データを用い、土地利用には国土交通省国土数値情報「KS-202-1」を用いた。解析領域は水平方向 10.3km×7.3km、鉛直方向 1.5km とし、16 方位の解析を行った。解析には 72 万点の計算格子を使用し、水平方向、鉛直方向最小メッシュをそれぞれ 20m, 1m とした。流入風は実スケールで上流 6km 地点における風洞実験の値を用いた。

本研究では建物の位置、形状および建物階数を(株)ゼンリン発行の住宅地図データベース「Zmap-TOWN2」から読み取った。建物の階高を 3.5m とし建物高に換算した。一部、電子地図情報と風洞模型(現地調査による)に不一致があったため、実際の風洞実験模型を参考に電子地図の高さや建物輪郭を修正した。図6には住宅地図データベースから求めた建物形状、建物階数及び格子ごとの建物の占有面積を示す。

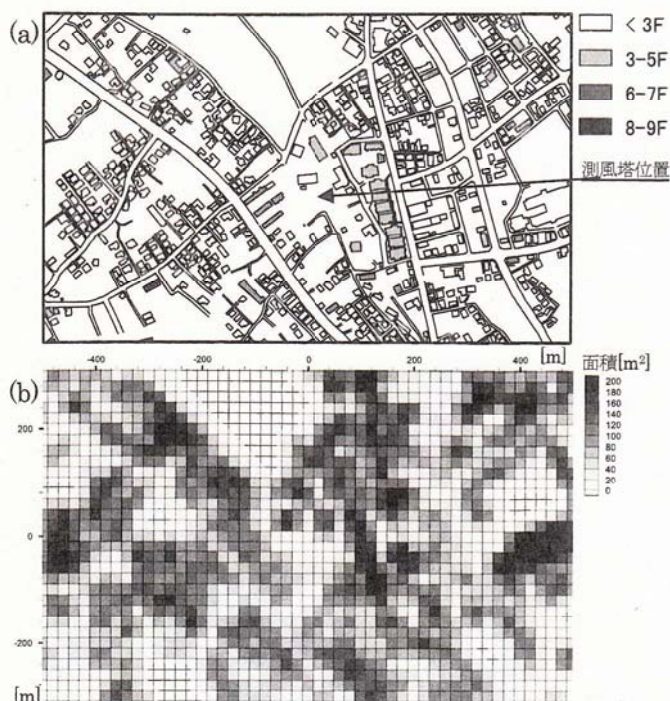


図 6 都市キャノピーモデルパラメータの抽出
株式会社「ZmapTOWN2」を元に作成した地方気象台測風塔を中心とした 0.6km×1km の範囲の建物階数分布図(a)と同電子地図から抽出した各計算格子内(20m×20m)の建物占有面積の水平分布図(b)

図 7(a)と(b)には、数値解析により求めた宮古気象台風観測塔位置(標高 13.5m)における風向別風速比(実地形上の風速と同地点における平坦地形上の風速との比)及び乱れ強度を示す。本研究で提案した一般化キャノピーモデルにより得られた値は従来の粗度モデルに比べて風洞実験に近いことがわかる。特に南から西、北にかけての風向および東風向における風速の過大評価と乱れ強度の過少評価が改善されていることが分かる。

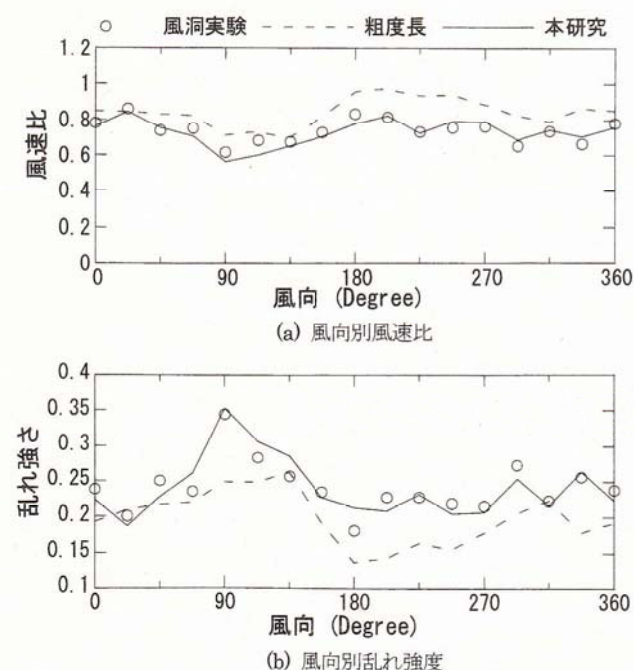


図 7 気流解析と風洞実験の比較 (地上高さ 13.5m)

5. まとめ

樹木と建物のいずれにも適用可能な一般化キャノピーモデルを提案し、風洞実験および実測結果と比較することにより、以下の結論を得た。

- 1) 多孔質媒体理論に基づき樹木や建物に適応可能な一般化キャノピーモデルを提案した。
- 2) 充填率が大きく異なる樹木と建物周辺の気流解析を行い実測値と比較し、提案手法の予測精度を検証した。
- 3) 実都市を再現した気流解析結果と風洞実験と比較し、本手法が市街地風況予測に有効であることを示した。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ, www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html.
- 2) 嶋田健司, 藤永崇志, 石原孟, 地域気象モデルと非線形風況予測モデルを用いた複雑地形下の風況予測, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.249-252, 2005.
- 3) 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, 第 406 号, 1989.12.
- 4) 丸山 敬, 市街地上空における耐風設計用気流性状の予測に関する研究, 学位論文, 1993.
- 5) 石原 孟, 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第 22 巻, 第 2 号, pp.387-396, 2003.
- 6) Burke, S.P, Plummer, W.B., Gas Flow through Packed Columns, Industrial and engineering chemistry, vol.20, No.11, p.p.1196-1200, 1928.11.
- 7) 石原 孟, 老川 進, 建物群落内外における流れ場の乱流特性と組織運動, 日本風工学会誌, No.75, 1998.4.
- 8) Green, S.R., Modeling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely Spaced Trees, PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics and its Applications, 5, pp.294-312, 1992.
- 9) 黒谷 靖雄, 清田 誠良, 小林 定教, 出雲地方の築地松が有する防風効果 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-2), pp.745-746, 2001.9.
- 10) 鈴木 淳一, 吉田 伸治, 大岡 龍三, 黒谷 靖雄, CFD 解析による出雲地方の築地松が有する防風効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-1), pp.871-872, 2002.8.
- 11) 石原 孟, 日比 一喜, 高層建物周辺の流れ場の乱流計測, 日本風工学会誌, Vol.76, pp.55-64, 1998.
- 12) 石原 孟, 山口 敦, 高原 景滋, 銘苅 壮宏, 新城 文博, 風洞実験と気流解析に基づく台風0314号の最大風速の推定, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.51A, 2005.3.