

一般化キャノピーモデルの提案と都市域における風況予測への応用

榎木 康太¹・石原 孟²

¹ 学生会員 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
(現・(株)大林組研究員 技術研究所 環境技術研究部)

E-mail: enoki.kota@obayashi.co.jp

² 正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(同上)

E-mail: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、まず植生、建物による流体力を統一して表現可能な流体力モデル及び従来解析の困難な高占有率の流れ場にも適用可能な乱流モデルを提案し、任意占有率のキャノピー内外流れ場を解析可能な一般化キャノピーモデルを構築した。次に、実都市の気流解析に不可欠な土地利用データ及び電子地図データによるモデルパラメータの算出方法を示し、様々な障害物が混在する場合の流体力の定式化を行った。そして、提案手法により占有率の低い樹木、様々な占有率の街区モデル、占有率の高い建物周りの気流解析を行い、適用可能性と予測精度を検証した。最後に、実都市内の観測点における年間の風況予測に適用した結果、メソスケール気象モデルに比べ予測誤差が大きく低減し、一般化キャノピーモデルが市街地風況予測に有効であることが明らかとなった。

Key Words : *generalized canopy model, fluid force model, turbulence model for various packing density, urban wind climate prediction*

1. はじめに

現代都市の快適性・安全性・利便性は、しばしば強風により損なわれている。具体的には、まず、高層建物周辺に発生するビル風による日常的な風環境の悪化が挙げられる¹⁾。高層建物の計画段階には周辺風環境への影響評価が行われ、植樹などによる緩和策が採られる。このような樹木、建物が混在する街区内の風環境を統一的なモデルで簡便かつ高精度に予測できる手法が望まれる。次に、台風時の強風による被害が挙げられる²⁾。台風による建築物の外装材の損傷が局所的な最大瞬間風速により発生し、その飛散により広範囲に渡り被害をもたらす。したがって、リスク管理の観点から広域の強風被害予測が重要である。さらに、強風は社会基盤インフラにも大きな影響を与える。2003年の台風14号では沖縄県宮古島にある約20000本の電柱のうち約1000本が倒壊し、島の生活や復興に大きな影響を与えた³⁾。また、強風時には道路・鉄道といった社会基盤インフラの利便性が低下する。特に、強風による鉄道の運行遅延や中止は、利用者に不便を強いると同時に、事業者に大きな経済的損失

を与える⁴⁾。防風柵の設置による対策が検討されているが、そのためには鉄道沿線の強風域の抽出が不可欠である。鉄道の特徴としては総延長が長い一方、その幅は十数mと狭いため、鉄道沿線の風環境予測には広域かつ高分解能の予測手法の開発が求められる。

現在、都市域の風環境予測手法としては、個々の建物を対象とする数値流体解析手法と都市全体を対象とするキャノピーモデルが存在する。個々の建物を対象とした数値流体解析では数km四方の領域を最小間隔数10cm～数mの計算格子を用いて解析を行う。その研究例としては、村上ら⁵⁾、Hunter et al.⁶⁾、田村ら⁷⁾、Kanda⁸⁾などが挙げられる。この手法により建物周りの詳細な流れ場を得られるが、実際の解析には建物データの準備、計算格子の生成、建物壁面の境界条件の設定が必要であり、計算負荷も大きい。これらの問題の解決のためにFavor法⁹⁾と呼ばれる手法が提案されており、その特徴としては計算格子界面における開口率により移流速度を算定することや建物壁面の境界条件の設定が不要といったことが挙げられる。都市の風環境解析に用いられた例としては片岡ら¹⁰⁾、足永ら¹¹⁾、Oguro et al.¹²⁾による研究が挙げられ

る。しかし、この手法では障害物による乱流の生成と消散がモデル化されていないことから、計算格子内の障害物の占有率によって平均風速および乱れ強度の予測精度が低下する問題が指摘されている。

一方、キャノピーモデルでは、障害物による流体力及び障害物による乱流の生成と消散項を運動量及び乱流の輸送方程式に付加することにより、建物や植生などの障害物による影響がモデル化され、広域風環境予測に広く用いられている。植生を取り扱うキャノピーモデルとしては Kondo and Akasi¹³⁾, Wilson and Shaw¹⁴⁾, Yamada¹⁵⁾, Green¹⁶⁾, Liu et al.¹⁷⁾, Katul et al.¹⁸⁾, 岩田ら¹⁹⁾による研究があり、また植生キャノピーモデルに倣い、建物表面積密度を植生の葉面積密度に対応させ、都市キャノピー層内の流れ場を予測したものとして Uno et al.²⁰⁾による研究がある。さらに植生と建物の体積を考慮した支配方程式を導出し、植生と建物の両方を考慮可能なキャノピーモデルが平岡ら²¹⁾により提案されている。Maruyama²²⁾は建物群落の抗力係数を風洞実験により求め、平岡ら²¹⁾により提案されたキャノピーモデルを実都市の気流予測に適用した。これらの既存のキャノピーモデルは数十 m～数百 m 程度の水平分解能を持つ街区に適用した場合により精度を示したが、個々の建物周りの気流予測に適用できないことや建物の占有率が 45% を超える場合の解析例が示されていない²²⁾といった問題がある。

このように都市域の強風により発生する問題の予測には、以上に述べた解析手法の長所を併せ持つ、広域かつ高分解能の気流解析手法の開発が必要である。広域かつ高分解能の風環境予測の例としては、メソスケール気象モデルと個々の建物を再現した数値流体解析手法を組合せた足永ら¹¹⁾や田村ら²³⁾による研究が挙げられる。しかし、これらの研究では広域のメソスケール解析では土地利用データベースを、数値流体解析では都市建物形状のデータベースを用いており、近藤²⁴⁾が指摘したように異なる解析モデル間の接続が問題となる。

そこで、本研究では都市域から街区、建物スケールまで任意の水平分解能を有する気流解析を実現するために、まず、建物、植生の効果を統一的に表現可能な流体力ならびに低占有率から高占有率までの都市キャノピーの解析に適用可能な乱流モデルを導出し、一般化キャノピーモデルを提案する。次に、実都市内の気流解析を行う上で必要な土地利用データ及び電子地図データに基づく一般化キャノピーモデルのパラメータの算出方法や様々な障害物が存在する場合の流体力の定式化を行う。そして、本研究で提案した一般化キャノピーモデルの予測精度を検証するために、占有率の低い植生、占有率の異なるモデル市街地および占有率 100% の建物を対象に解析を実施し、実験および実測結果との比較検討を行う。最後に、本研究で提案した一般化キャノピーモデルを用いて、実

際の都市域内の風況予測を行い、その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

建物、植生による流れ場への影響を考慮可能な一般化キャノピーモデルを提案するために、本章では、まず本研究で用いる基礎方程式を示す。次に、計算格子内に存在する障害物を流体力により表すモデルを提案し、既存の流体力モデルとの関係を明らかにする。最後に、低占有率から高占有率までのキャノピーにも適用可能な乱流モデルを提案する。

(1) 基礎方程式

固体を含む流れ場の解析には、流体部分のみの支配方程式を構築する方法(村上ら²⁵⁾, 平岡ら²¹⁾など)と、固体部分と流体部分を合わせた計算格子全体の体積にわたって平均化した物理量に関する支配方程式を構築する方法がある。本研究では後者を用いる。非線形風況予測モデル MASCOT²⁶⁾ (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) に建物や樹木等の影響を考慮するため、以下に示す質量保存則および運動量保存則に関する基礎方程式に流体力を取り入れた。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + f_{\bar{u}_i} \quad (2)$$

ここで、 \bar{p} は平均圧力、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数である。また \bar{u}_i と u'_i は単位体積あたりの i 方向の速度成分の平均値と変動値であり、 $\rho \overline{u'_i u'_j}$ はレイノルズ応力、 $f_{\bar{u}_i}$ は流体力を表す。なお、本研究では有限体積法に基づき式(1)及び式(2)の離散化を行う。そのため、任意の変数 ϕ の空間平均値を $\langle \phi \rangle$ 、時間平均値を $\hat{\phi}$ と表記すると、平均値 $\bar{\phi}$ は次式により定義される。

$$\hat{\phi} = \overline{\langle \phi \rangle} = \frac{1}{V_{\text{grid}}} \int_{V_{\text{grid}}} \phi dV \quad (3)$$

また、変数 ϕ の平均値 $\bar{\phi}$ からの変動を ϕ' と表す。なお、本研究において式(3)の関係が適用されるのは流速 \bar{u}_i 、乱流エネルギー \bar{k} 、乱流逸散率 $\bar{\varepsilon}$ 及び圧力 \bar{p} である。

体積 V_{grid} を有する計算格子内の障害物の体積を V_o とした時に占有率 γ_o は次式で表される。

$$\gamma_o = \frac{V_o}{V_{\text{grid}}} \quad (4)$$

また、計算格子内の空隙率 γ_f と占有率 γ_o とは以下の関係にある。

$$\gamma_f = 1 - \gamma_o = \frac{V_{\text{fluid}}}{V_{\text{grid}}} \quad (5)$$

ここで、 V_{fluid} は計算格子内の流体体積である。

計算格子内の流体の単位体積あたりの物理量 $\tilde{\phi}$ と計算格子内の単位体積あたりの物理量 $\bar{\phi}$ との関係は、占有率 γ_o もしくは空隙率 γ_f を用いて次のように表される。

$$\bar{\phi} = \gamma_f \tilde{\phi} = (1 - \gamma_o) \tilde{\phi} \quad (6)$$

したがって、計算格子内の流体の平均速度 \tilde{u}_i 、平均圧力 \tilde{p} 、乱流エネルギー \tilde{k} 及びその散逸率 $\tilde{\varepsilon}$ は、それぞれ解析から得られる \bar{u}_i 、 \bar{p} 、 \bar{k} 、 $\bar{\varepsilon}$ を用いて式(6)により求められる。また、障害物が存在する場合、固体部分の単位体積あたりの流速、乱流エネルギーとその逸散率及び平均圧力は0とする。なお、本研究では固体部分の密度 ρ_o に関しては、流体密度 ρ と等しいと仮定する。すなわち

$$\rho_o = \rho \quad (7)$$

となる。

なお、上で述べた二つの方法により構築される支配方程式に関して非線型項である移流項とレイノルズ応力項のモデル化に違いがあるが、線形項は全く同じである。前者では移流項における移流速度を実際の流体速度 \tilde{u}_i を用いて評価しているのに対して、後者では \bar{u}_i を用いている。

本研究ではレイノルズ応力 $\overline{\rho u'_i u'_j}$ は線形渦粘性型モデルにより近似した。

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} - 2\mu_t S_{ij} \quad (8)$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。乱流渦粘性係数 μ_t 及び変形速度テンソル S_{ij} は次式により表される。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}} \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

ここで、 $C_\mu = 0.09$ とした。また乱流エネルギー \bar{k} 及び乱流エネルギーの散逸率 $\bar{\varepsilon}$ は以下の輸送方程式より求める。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \bar{k}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{k}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] \\ &- \left[\frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - P_k \right] - \rho \bar{\varepsilon} + f_k \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] \\ &- C_{\varepsilon 1} \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} \left[\frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - P_k \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}} + f_\varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

式中の定数は標準 $k - \varepsilon$ モデルの値を用い、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 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 \bar{k} 及びその散逸率 $\bar{\varepsilon}$ の生成項を表す。なお、淀み点付近での乱流エネルギーの過大生成を抑制するため、乱流生成項 P_k はKato and Launder²⁷⁾モデルにより評価した。

$$P_k = \mu_t \sqrt{2S_{ij}^2} \sqrt{2\Omega_{ij}^2} \quad (13)$$

ここで、回転速度テンソル Ω_{ij} は次式により表される。

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

以下、 $f_{\bar{u}_i}$ 、 f_k および f_ε のモデル化について述べる。

(2) 流体力の定式化

これまでに建物群落、植生に応じて様々な流体力モデルが提案されている。また流体力を表す式に現れるパラメータも障害物の種類により異なる。そこで、本研究ではまず、障害物の抗力係数と見つけ面積を用いて流体力の定式化を行う。次に、既存の流体力モデルを表すパラメータと本研究で提案した流体力モデルとの関係を明らかにする。これにより、これまでに蓄積された様々な障害物に関する流体力モデルのデータベースを利用可能にすると共に、流体力を表す式の一般化を行う。

一般に見つけ面積 A_o と抗力係数 C_D を持つ任意の物体に作用する抗力は次のように表される。

$$F_{\bar{u}_i} = \frac{1}{2} \rho C_D A_o |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (15)$$

ここで、 \bar{u}_i は流体の速度を表す。また $|\bar{u}|$ は流体速度の絶対値である。流体力は抗力と釣り合うため体積 V_{grid} を有する計算格子の単位体積あたりの流体力 $f_{\bar{u}_i}$ は式(15)より次式で表される。

$$f_{\bar{u}_i} = -\frac{F_{\bar{u}_i}}{V_{\text{grid}}} = -\frac{1}{2} \rho C_f \frac{\gamma_o}{l_o} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (16)$$

ここで、 $|\bar{u}|$ は計算格子内の単位体積あたりの平均速度の絶対値である。等価抗力係数 C_f は計算格子体積 V_{grid} に占める物体体積の割合である γ_o と抗力係数 C_D を用いて、また、障害物の代表長さ l_o は障害物体積 V_o と見つけ面積 A_o を用いて以下のように表される。

$$C_f = \frac{C_D}{(1 - \gamma_o)^2}, \quad (17)$$

$$l_o = \frac{V_o}{A_o} \quad (18)$$

式(18)から障害物の代表長さは障害物の奥行き長さに対応していることが分かる。式(16)に現れる障害物の等価抗力係数 C_f 、代表長さ l_o 、物体の占有率 γ_o は何れも障害物に関連し明確に定義されているパラメータであることが分かる。以下、これらのパラメータと既存の流体力モデルにあるパラメータとの関係を明らかにする。なお以下では、障害物が計算格子内に均一に分布していることを前提として各モデルの定式化を行う。

a) 建物群落のモデル化

均一な建物からなる建物群落の抵抗を表す流体力モデルとして Maruyama²²⁾によるものが挙げられ、流体部分の単位体積あたりの流体力 $f_{\bar{u},i}$ は式(15)に基づき次のように表される。

$$f_{\bar{u},i} = \frac{-F_{\bar{u},i}}{V_{\text{fluid}}} = -\frac{1}{2}\rho C_{D,u} a_u |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (19)$$

ここで、 $C_{D,u}$ は建物群の抗力係数、 a_u は粗度表面積密度と呼ばれ、次式で定義される。

$$a_u = \frac{A_u}{V_{\text{fluid}}} \quad (20)$$

また建物群落の見つけ面積 A_u は次式で定義される。

$$A_u = \frac{S_u}{4} \quad (21)$$

ここで、 S_u は計算格子内の全ての建物の壁面面積の和である。式(21)は建物を正方形水平断面を持つ角柱と仮定し、一つの壁面を見つけ面積と定義したことと等価である。Maruyama²²⁾は、様々な建物密度を有する建物群落を対象とした風洞実験を行い、建物群落の抗力係数 $C_{D,u}$ を建物密度 γ_u の関数として求めた。建物密度 γ_u は単位体積中に建物の占める割合を表し、次式により定義される。

$$\gamma_u = \frac{V_u}{V_{\text{grid}}} \quad (22)$$

ここで、 V_u は計算格子内の全ての建物の体積の和である。なお、式(19)は、建物群落全体に対して定義されているが、群落を構成する個々の建物による流体力についても

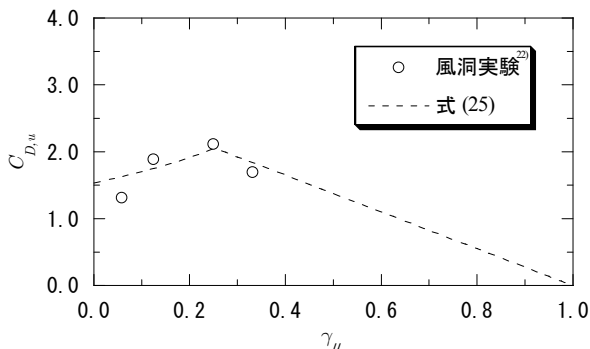


図-1 抗力係数 $C_{D,u}$ の占有率 γ_u による変化

適用可能である。すなわち、建物群落の流体力は個々の建物による流体力の総和で定式化されている。

本研究の建物群落に関しては Maruyama²²⁾のモデルと同様なモデル化を行う。占有率 γ_o は計算格子内に占める固体部分の割合であることから、次式が成り立つ。

$$\gamma_o = \gamma_u \quad (23)$$

また代表長さ l_o は Maruyama²²⁾と同様に見つけ面積を用いて定義すると、次式が成り立つ。

$$l_o = \frac{V_u}{A_u} = \frac{V_u}{S_u/4} \quad (24)$$

図-1には建物群落の抗力係数 $C_{D,u}$ の占有率 γ_u による変化を示す。図中のプロットは風洞実験²²⁾から得られた値である。抗力係数は占有率が25%の時に最大値をとり、その後は占有率の増加とともに減少することが分かる。この傾向は占有率25%付近で粗度長が最大値をとるといふ Counihan²⁸⁾により求められた占有率と粗度長の関係に類似している。低占有率の時に流れ場は isolated roughness flow^{29),30),31)}であり、建物群落の抗力係数は個々の建物の抗力係数とほぼ等しくなる。占有率が高くなるにつれ、流れ場は wake interference flow^{29),30),31)}へと変化し、建物群落内外の運動量の交換が活発になり、25%付近で最大となる。その後、建物の占有率の増加に伴い、流れ場は skimming flow (cavity flow とも呼ぶ)^{29),30),31)}へと変化する。この場合には、計算格子内の建物の見つけ面積の和は増加するものの、建物群落全体の抗力係数が減少する。本研究ではこれらの結果を考慮し、建物群落を構成する建物の抗力係数を以下のようにモデル化した。

$$C_{D,u} = \min \left[\frac{1.53}{(1-\gamma_u)}, 2.75(1-\gamma_u) \right] \quad (25)$$

式にある係数は最小二乗法により決定した。式(16)、式(19)、式(20)、式(23)、式(24)及び式(25)より建物群落の等価抗力係数 C_f は次式のようになる。

$$C_f = \frac{1}{(1-\gamma_u)^3} \min \left[\frac{1.53}{(1-\gamma_u)}, 2.75(1-\gamma_u) \right] \quad (26)$$

等価抗力係数 C_f は $\gamma_u=1$ の時に無限大になってしまうため、本研究では占有率 γ_u の上限値を $1-\delta$ と定義し、 δ の値を 1.0×10^{-4} とした。より小さい値の δ を用いても流れ場は変化しないことを確認した。

以上のように、建物群落に関し、式(26)に示す等価抗力係数 C_f 、式(24)に示す代表長さ l_o および式(23)に示す占有率 γ_o を用いることにより、本研究で提案した流体力は Maruyama²²⁾の提案した流体力と等価になる。

b) 植生のモデル化

通常、植生が流れ場に及ぼす計算格子の単位体積あたりの流体力 f_{tree} は次式で表される。

$$f_{\text{tree}} = -\frac{1}{2}\rho C_{D,t} a_t |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (27)$$

ここで、 $C_{D,t}$ は植生の抗力係数、 a_t は葉面積密度[m⁻¹]

表-1 既存の流体力モデルと本モデルとの関係

障害物の種類	既往の流体力モデルとそのパラメータ	本モデルのパラメータとの関係
植生 ¹⁴⁾	$f_{\bar{u},i} = -\frac{1}{2}\rho C_{D,t} a_t \bar{u} \bar{u}_i$ $C_{D,t}, a_t : \text{given}$	$C_f = C_{D,t}$ $\frac{\gamma_o}{l_o} = a_t$
建物群落 ²²⁾	$f_{\bar{u},i} = -\frac{1}{2}\rho C_{D,u} a_u \bar{u} \bar{u}_i$ $\gamma_u = V_u / V_{\text{grid}}$ $C_{D,u} = C_{D,u}(\gamma_u)$ $a_u = \frac{S_u}{4(1-\gamma_u)V_{\text{grid}}}$ $V_u, S_u, C_{D,u} : \text{given}$	$C_f = C_{D,u} / (1-\gamma_u)^3$ $l_o = 4V_u / S_u$ $\gamma_o = \gamma_u$

である。葉面積密度 a_t は計算格子体積 V_{grid} 内部に存在する葉の面積 S_{leaf} を用いて次式で定義される。

$$a_t = \frac{S_{\text{leaf}}}{V_{\text{grid}}} \quad (28)$$

提案式(16)に現れるパラメータ C_f , γ_o , l_o と従来の植生モデル(式(27))のパラメータ $C_{D,t}$, a_t との関係を示す。

まず抗力係数に関しては、

$$C_f = C_{D,t} \quad (29)$$

とし提案式の等価抗力係数を従来の植生モデルの抗力定数とを一致させた。

次に本研究で定義した占有率 γ_o は式(4)の定義より

$$\gamma_o = \frac{V_{\text{leaf}}}{V_{\text{grid}}} \quad (30)$$

となる。ここで、 V_{leaf} は計算格子体積 V_{grid} 内部に存在する葉の総体積である。

最後に、代表長さ l_o は樹木の代表面積として葉の面積の総和 S_{leaf} を用いると、次式のようになる。

$$l_o = \frac{V_{\text{leaf}}}{S_{\text{leaf}}} \quad (31)$$

この場合、代表長さ l_o の物理的な意味は葉の厚さに対応する。植生に関しては式(16)中に現れる占有率と代表長さの比 γ_o / l_o が直接求められる。

$$\frac{\gamma_o}{l_o} = \frac{\gamma_o S_{\text{leaf}}}{V_{\text{leaf}}} = \frac{S_{\text{leaf}}}{V_{\text{grid}}} = a_t \quad (32)$$

ここで、通常、樹木のパラメータ $C_{D,t}$, a_t の算定³²⁾では、式(30)、式(31)中の葉の体積 V_{leaf} が計算格子体積 V_{grid} に比べて非常に小さく、無視できるため V_{leaf} に関する情報は提供されない。占有率 γ_o は、便宜的に葉厚 l_o を $1.0 \times 10^3 \text{m}$ のような現実的な値を仮定し、式(32)から算出する。

植生に関しては、本研究で提案したキャノピーモデルの抗力係数を式(29)により、占有率と代表長さの比を式(32)により求めることで、従来の植生キャノピーモデル

と等価な流体力となる。

これまでの議論をまとめると表-1 のようになり、本研究で提案された流体力のモデル(式(16))により、異なる形式で表現された建物群落及び植生の流体力を、障害物の等価抗力係数、占有率、代表長さの3つのパラメータにより統一的に記述可能となった。

(3) 障害物による乱流生成項のモデル化

キャノピー層内部では計算格子の解像度以下の障害物と流れ場の相互作用により、乱れの生成や消散の過程が変化する。そこで障害物の占有率と乱流生成の物理過程に着目し、キャノピー層乱流モデルに関する提案を行う。

建物、植生などのキャノピー層内部の障害物により乱流が生成・消散される過程を表したモデルとして次に示す平岡ら²¹⁾により提案されたものがある。

$$f_k = \frac{1}{2}\rho C_f a |\bar{u}|^3 \quad (33)$$

$$f_\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}}{k} C_{pe1} \frac{\sqrt{k}^3}{L} \quad (34)$$

ここで、 a は植生の場合は葉面積密度、建物の場合は建物表面積密度である。また L はキャノピー層の特徴長さスケールで a の逆数が用いられる。Maruyama²²⁾ は C_{pe1} の最適値を建物の占有率の関数とし実験から求めた。この研究では C_{pe1} は占有率の増加と共に急激に大きくなる傾向を示すものの、占有率45%以上の解析例は示されておらず最適値が求められていない。

一方、植生キャノピー内の樹木により生成される乱流の影響を評価したモデルとしては、樹冠内のエネルギーカスケードの促進過程を考慮した Green¹⁶⁾, Liu et al.¹⁷⁾ のモデルがある。

$$f_k = \frac{1}{2}\beta_p \rho C_f a |\bar{u}|^3 - \frac{1}{2}\beta_d \rho C_f a |\bar{u}| \bar{k} \quad (35)$$

$$f_\varepsilon = \frac{1}{2} C_{pe1} \beta_p \rho \frac{\bar{\varepsilon}}{k} C_f a |\bar{u}|^3 - \frac{1}{2} C_{pe2} \beta_d \rho C_f a |\bar{u}| \bar{\varepsilon} \quad (36)$$

このモデルでは、運動量保存則から導出される k の生成項に、植生内の微物理過程によるエネルギー収支バランスの変化³³⁾を考慮した消散項を付加している。式中のモデル定数は $\beta_p = 1.0$, $\beta_d = 4.0$ である。また、逸散率の生成項 f_ε 中の C_{pe1} , C_{pe2} は Liu et al.¹⁷⁾, Katul et al.¹⁸⁾, 岩田ら¹⁹⁾により、植生キャノピーに対する検討がなされている。Liu et al.¹⁷⁾の論文では C_{pe1} と C_{pe2} の最適値はそれぞれ 1.5 と 0.6 であるのに対して、岩田ら¹⁹⁾の研究では C_{pe1} と C_{pe2} の最適値は 1.8 と 1.5 であった。これらのことから、植物の種類によってモデル係数 C_{pe1} の変化は小さいが、モデル係数 C_{pe2} は 0.6~1.5 の値を取り得るこ

とが分かる。

a) 乱流エネルギー生成項 f_k のモデル係数の同定

乱流エネルギーの過大生成の抑制過程が考慮された式(35)は高占有率のキャノピー層にも適用可能であると考えられるが、実際にこれらの式を用い占有率の高い都市キャノピー層内乱流を評価した場合、占有率が60%を超えると解析が発散するといった問題が生じ、占有率の低い従来の植生キャノピー層内乱流モデルは占有率の高い都市キャノピー内の流れの予測に適用できないことが分かった。

そこで、本研究では式(35)にあるモデル係数 β_p は1.0とし、モデル係数 β_d は占有率 γ_o の関数であると仮定し、次式により定式化した。

$$\beta_d = \min\left(4.0, \left|\bar{u}\right|^2 / \bar{k}\right) \quad (37)$$

占有率が低い時にはGreen¹⁶⁾の提案した4.0を用いる。一方、占有率が高い時には障害物による乱流エネルギーの生成と消散が等しくなると仮定し、式(35)から式(37)の第二項を導出した。以上の仮定はこれまでの研究結果と一致している。例えば、石原と老川の研究^{30),31)}によると、都市群落内の建物の建蔽率(占有率)が高くなると、建

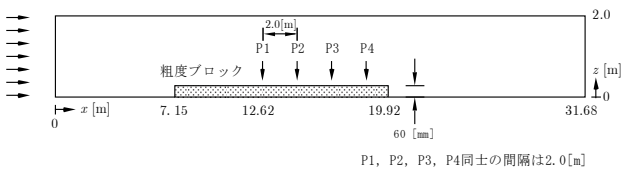


図-2 高占有率キャノピー層解析概略図

表-2 解析条件

解析領域	x 方向32m× z 方向2m
最小格子間隔	x 方向180mm, z 方向5mm
床面粗度	$z_0 = 7.0 \times 10^{-5}$ m
モデル建物の形状	一辺60mmの立方体粗度ブロック
占有率	78.0%, 99.9%

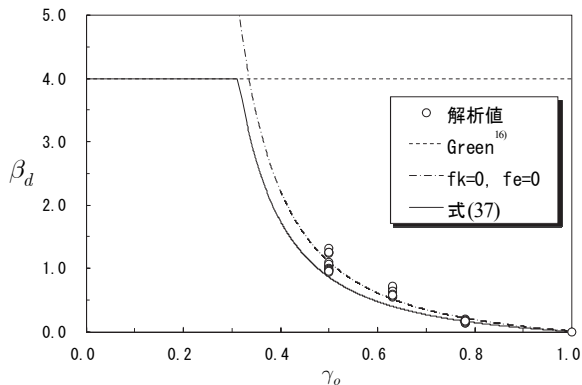


図-3 モデル係数 β_d と占有率 γ_o の関係

物周りの流れ場のパターンは変化し、乱流エネルギーの生成と消散がバランスするような cavity flow が形成される。また、最近では持田ら³⁴⁾と石田ら³⁵⁾の研究により占有率の高い都市建物群落内乱流エネルギーの生成と消散がほぼバランスしていることが明らかにされた。

占有率が高い場合の β_d と占有率 γ_o の関係を求めるため、占有率が高い時に乱流エネルギーの生成と消散が完全にバランスすると仮定し、式(11)、式(12)にある乱流エネルギーの生成項 f_k と散逸率の生成項 f_e を0として流体力 $f_{u,i}$ のみを考慮した数値解析を行い、式(37)第二項の値を求めた。

図-2には解析領域を示す。モデル建物は一辺60mmの立方体ブロックとして模擬し、ブロックの占有率は78.0%, 99.9%となるように配置した。解析条件は表-2に示す。流入風の鉛直分布は図-15に示す。

キャノピー層内の流れ場が平衡状態にあると思われるP1, P2, P3, P4地点(図-2)において、キャノピー層内鉛直方向の4点($z=0.0225, 0.0275, 0.0325, 0.0375$ m)の計16点のデータを抽出し、 $|\bar{u}|^2 / \bar{k}$ を求めた。占有率 γ_o と解析から求めた $|\bar{u}|^2 / \bar{k}$ の値を次式により回帰した。

$$\frac{|\bar{u}|^2}{\bar{k}} = \alpha_{k1} \exp\left(\frac{1 - \gamma_o}{\gamma_o}\right) + \alpha_{k2} \quad (38)$$

ここで、モデル定数 α_{k1} と α_{k2} はそれぞれ0.5, -0.5と同定された。図-3には本研究で提案したモデル係数 β_d の占有率 γ_o による変化を示す(実線)。なお、図-3中にはGreenの β_d (点線)及び占有率50.0%, 62.8%, 78.0%, 99.9%の場合の乱流エネルギーの生成項と逸散率の生成項を0として流体力のみを考慮した解析値(白抜き点)、それらに式(38)を適用した場合に同定された曲線(破線)も合わせて示す。なお、本研究で用いるモデル(実線)は式(38)の同定の際に占有率78.8%, 99.9%の解析値のみを使用している。本研究の β_d は低い占有率の場合にGreen¹⁶⁾により提案された β_d と等しく、占有率31.2%を超えると、乱流エネルギーの生成と散逸がバランスすると仮定した曲線に漸近することがわかる。

b) 乱流散逸率の生成項 f_e のモデル係数の同定

一方、乱流エネルギーの逸散率 ε に関しては、式(36)にある C_{pe1} の値をGreen¹⁶⁾に倣い1.5とし、 C_{pe2} は占有率 γ_o の関数であると仮定し次式のように定式化した。

$$C_{pe2} = \begin{cases} 0.7 & (\gamma_o \leq \gamma_c) \\ C_{pe2}(\gamma_o) & (\gamma_o > \gamma_c) \end{cases} \quad (39)$$

ここで、 γ_c は前節の β_d のモデル化におけるGreen¹⁶⁾の β_d である4.0と式(38)の交点にあたる占有率0.312である。 γ_c より占有率の低い場合は C_{pe2} を第4章で述べるモデル市街地の解析により同定した。一方、 γ_c より高占有率

の時は、前述の β_d のモデル化に用いた仮定より乱流エネルギーの生成と消散がバランスしていることを考慮した解析を行い、占有率 γ_o の関数としてモデル化した。

まず、低占有率の時の C_{pe2} の同定について述べる。図-4には第4章で述べるモデル市街地の風洞実験において境界層が最も発達した位置(図-2 中観測点 P3)の高度0.09m(市街地モデル高さ0.03mの3倍)における乱流エネルギーの実測値と C_{pe2} の値を0.5から1.5までの範囲を0.2刻みで変化させた解析の結果を示す。なお、ここで示す乱流エネルギーは境界層上部の風速の二乗で無次元化されている。占有率5.6%の時には解析値は C_{pe2} の値に敏感ではなく、いずれの値でもほぼ同様な予測結果を示す。一方、占有率が高くなるに従い、予測値は C_{pe2} の値によって大きく変化することがわかる。最適な C_{pe2} は占有率12.5%では0.9程度、占有率25.0%では0.7程度である。本研究では、これらの結果より、0.0~31.2%の低占有率では C_{pe2} の値を0.7とした。これはLiu et al.¹⁷⁾の0.6に近い値である。

次に、高占有率の時の C_{pe2} のモデル化について述べる。前述の β_d のモデル化において乱流エネルギーの生成と消散がバランスしていることを考慮し、 $f_s=0$ の仮定から $C_{pe2}=C_{pe1}$ が導出される。よって占有率99.9%及び78.0%の時は $C_{pe2}=C_{pe1}=1.5$ となる。一方、占有率が γ_c より低い時は $C_{pe2}=0.7$ である。これらの条件より、 γ_c より高い占有率では C_{pe2} を次式によりモデル化する。

$$C_{pe2}(\gamma_o) = \alpha_{e1} \sqrt{\sin\left(\pi \frac{\gamma_o - \gamma_c}{2(1 - \gamma_c)}\right)} + \alpha_{e2} \quad (40)$$

ここでモデル定数 α_{e1} 、 α_{e2} はそれぞれ0.8、0.7である。図-5には C_{pe2} と占有率 γ_o の関係を示す。図中のプロットは解析により同定した値、実線は式(39)により求めた値を示す。

表-3には本研究で提案した乱流モデルのモデル係数と既往乱流モデルのモデル係数の比較を示す。モデル係数 β_p と C_{pe1} は従来のモデルと同じであるが、モデル係数 β_d と C_{pe2} は本乱流モデルでは占有率の関数となっている。これにより、これまで解析不能であった高占有率の流れ場の解析が可能となったと共に、低占有率から高占有率までの流れ場の予測精度も向上させた。

3. 実都市のモデル化

実都市の地表面には、様々な障害物が存在しており、前章で提案した流体力モデルに基づき、同一計算格子内に複数の障害物が混在する場合の流体力を算出する必要がある。現在、入手可能な実都市の地表面の性状を表したデータには、100m程度の格子状にその地域を代表する土地利用形態が収められたラスタ形式の土地利用データ³⁶⁾と個々の建物形状や建物の高さを収めたベクトル

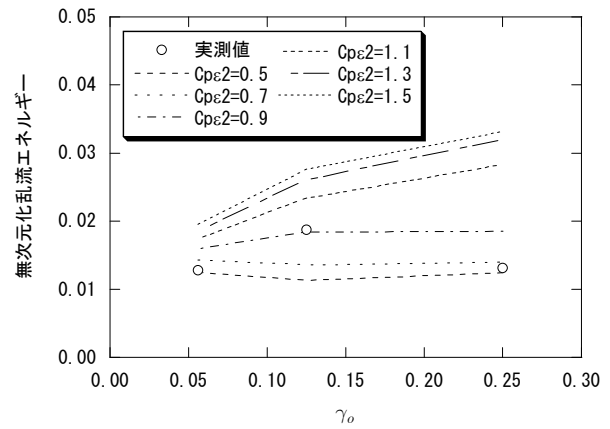


図-4 乱流エネルギー予測値の C_{pe2} による変化

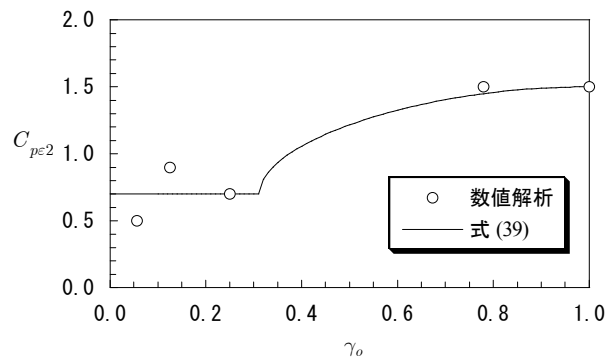


図-5 モデル定数 C_{pe2} と占有率 γ_o の関係

表-3 本研究で提案した乱流モデルのモデル係数と既往乱流モデルのモデル係数との比較

	対象	β_p	β_d	C_{pe1}	C_{pe2}
Green ¹⁶⁾	植生	1.0	4.0	1.5	1.5
Liu et al. ¹⁷⁾	植生	1.0	4.0	1.5	0.6
本研究	植生, 建物	1.0	式(37)	1.5	式(39)

形式の電子地図³⁸⁾などがある。本章では、まず、土地利用データに関し、単一の土地利用形態に基づく一般化キャノピーモデルのパラメータの算出方法を述べる。次に、建物及び植生の電子地図に基づき、パラメータを算出する方法を示す。そして、流体力の算出に必要な占有面積や周囲長などの幾何的なパラメータの算出方法について述べる。最後に、異なる種類の障害物が同一計算格子内に混在する場合の流体力の算出方法を示す。なお、本章で用いる変数の上添え字はデータの形式を示しており、ラスタ形式の土地利用データに関する変数は上添え字 r により、ベクトル形式の電子地図データに関する変数は上添え字 v により表す。特に、ベクトル形式の電子地図データでは、建物と植生の処理方法が異なるため、差異を明確にするため、建物には上添え字 v_b を、植生には上添え字 v_p を用いる。

表-4 各土地利用における地表面粗度長および障害物の等価抗力係数, 占有率, 代表長さ, 平均高さ

土地利用	地表面粗度長 [m]	抗力係数 $C_{f,\lambda}^r$	占有率 $\gamma_{o,\lambda}^r$	代表長さ $l_{o,\lambda}^r$ [m]	平均高さ h_{λ}^r [m]
田	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0
畑	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
果樹園	0.03	0.4	0.001	0.01	3.3
その他の樹木畑	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
森林	0.03	0.4	0.001	0.01	13.3
荒地	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0
建物用地 A	0.03	3.00	0.155	39.4	11.4
建物用地 B	0.03	2.88	0.146	38.1	5.18
幹線交通用地	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
その他の用地	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0
湖沼	0.0002	0.0	0.0	0.0	0.0
河川敷 A	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0
河川敷 B	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0
海浜	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0
海水域	0.0002	0.0	0.0	0.0	0.0

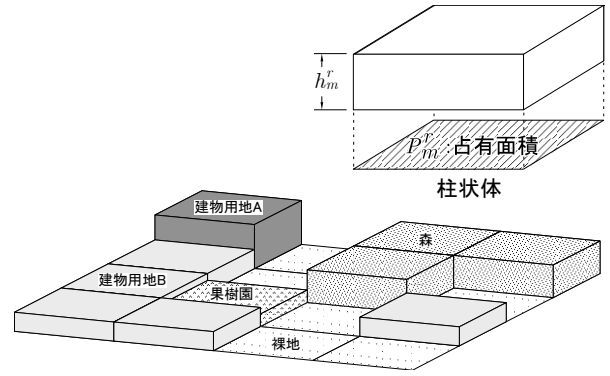


図-6 土地利用データの柱状体によるモデル化

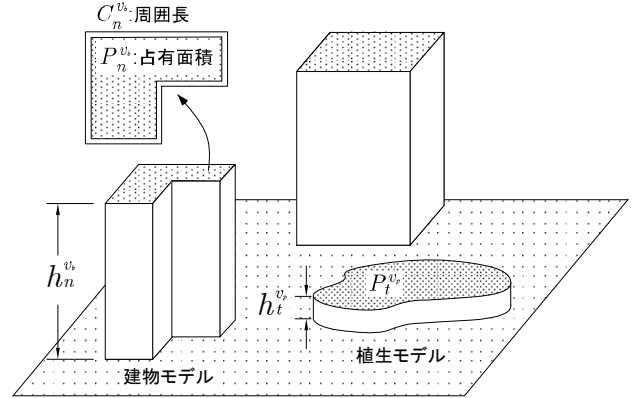


図-7 建物及び植生の柱状体によるモデル化

(1) 土地利用情報によるパラメータの同定

まず, 土地利用情報に基づき一般化キャノピーモデルのパラメータの算出方法について述べる. ここで, 土地利用データ³⁶⁾は表-4 に示した土地利用種別に分類され, 本研究では建物用地 A 及び B, 果樹園, 森林の 4 つの土地利用を一般化キャノピーモデルにより考慮し, それぞれをインデックス λ ($\lambda = 1, \dots, 4$) により表現する. その他の土地利用に関しては地表面粗度によりモデル化し, 詳細は本章(4)節で述べる. 各土地利用種別 λ に対しそれぞれ固有の抗力係数 $C_{f,\lambda}^r$, 占有率 $\gamma_{o,\lambda}^r$, 代表長さ $l_{o,\lambda}^r$ 及び平均高さ h_{λ}^r が得られているとする. ここで, 個々の土地利用データに着目し, データのインデックスを m で表す ($m = 1, \dots, M$). その土地利用種別を λ_m , 等価抗力係数を $C_{f,m}^r$, 代表長さを $l_{o,m}^r$, 占有率を $\gamma_{o,m}^r$, 流体力を f_m^r とする. 各土地利用は, 図-6 に示した占有面積 P_m^r , 平均高さ h_m^r の柱状体として近似される. なお, 柱状体の内部では障害物が均一に分布すると仮定し, 抗力係数, 代表長さ及び占有率は一定とする. また, 占有面積 P_m^r は本章(3)節の方法により求める. 各種土地利用を柱状体でモデル化したため, 計算格子内のそれぞれの土地利用の占有面積は高さ方向に変化しない. 地上から鉛直方向 k 番目の計算格子の高さ方向長さを dz_k とし, その計算格子内の個々の柱状体が占める領域の高さ方向の長さ $dh_{m,k}^r$ を次式で定義する.

$$dh_{m,k}^r = \begin{cases} dz_k & (h_m^r > Z_k) \\ h_m^r - Z_{k-1} & (Z_{k-1} < h_m^r < Z_k) \end{cases} \quad (41)$$

表-5 本研究で使用する電子住宅地図の形式

建物情報	収録形式	実データ
建物位置・形状	ポリゴン(面)	座標値
建物高さ	建物属性情報	整数または実数

ここで,

$$Z_k = \sum_{q=0}^k dz_q, \quad dz_0 = 0, \quad k \geq 1 \quad (42)$$

である. すなわち, 高さ h_m^r の柱状体の地表面から第 k 層内にある部分の長さ $dh_{m,k}^r$ はその柱状体が計算格子内にある部分の高さで定義される. この時, 各計算格子内の柱状体の占有率 $\gamma_{o,m}^r$ は次式ようになる.

$$\gamma_{o,m}^r = \frac{dh_{m,k}^r}{dz_k} \gamma_{o,\lambda_m}^r \quad (43)$$

また, 代表長さ $l_{o,m}^r$ は, 柱状体領域内では障害物が均一に分布すると考え, 土地利用に固有な代表長さをを用いる.

$$l_{o,m}^r = l_{o,\lambda_m}^r \quad (44)$$

抗力係数も同様に考えると次式を得る.

$$C_{f,m}^r = C_{f,\lambda_m}^r \quad (45)$$

土地利用情報に基づく柱状領域に関しては, 式(43)により占有率を, 式(44)のより代表長さを, 式(45)により抗

力係数を求める。流体力の算出方法については本章(4)節で述べる。

$$\gamma_o^{v_b} = \gamma_u = \frac{\sum_n P_n^{v_b} dh_{n,k}^{v_b}}{V_{\text{grid}}} \quad (46)$$

(2) 電子地図によるキャノピーパラメータの同定

土地利用情報では個々の建物形状や高さが分からないため、計算解像度を高めても気流解析の精度向上には繋がらない。実際の都市では、建物形状や植生の生息域の分布及びそれらの高さは様々であり、詳細な電子地図を用いることにより、土地利用情報に比べ、より高精度なモデル化が可能となる。ここではまず、建物に関して電子住宅地図を利用した一般化キャノピーモデルのパラメータの同定方法について述べる。次に、植生に関する電子地図を利用したパラメータの同定方法について述べる。

電子住宅地図が利用可能な場合には、計算格子内の建物の占有率と代表長さを建物の占有面積や建物の階高などの建物に関する情報から求めることができる。電子住宅地図にある建物の空間情報としては、建物の位置・形状、建物階数等がある。表-5には本研究で用いる電子住宅地図の基本的なデータ形式を示す。電子住宅地図には、個々の建物形状を示す頂点からなる多角形領域と、その属性情報として建物高が収録されている。本研究では電子住宅地図として(株)ゼンリン発行の Zmap-Twon 2³⁸)を用いた。Zmap-Twon 2³⁸)の建物形状は、平面直角座標系(日本測地系)の座標値のポリゴンで表され、建物高は整数値の建物階数として収録されている。なお、本研究ではERIS ArcGIS³⁹⁾を用い建物位置・形状情報をシェープファイル⁴⁰⁾に、建物階数をシェープファイルの属性情報に変換し使用した。

本研究では、個々の建物の3次元形状を図-7に示したように柱状体により近似し、添え字 n ($n = 1, \dots, N$) で表した個々の建物の水平占有面積を $P_n^{v_b}$ 、周囲長を $C_n^{v_b}$ 、建物の高さを $h_n^{v_b}$ とする。建物高さ $h_n^{v_b}$ はデータベースの階数に階高を乗じ求める。本研究では建物の階高として足永・東海林⁴¹⁾が東京23区内の建物の建築面積に応じた加重平均により求めた値 4.1m を用いる。階数が不明な建物は、一律に2階建とした。また、建物の水平占有面積 $P_n^{v_b}$ 及び周囲長 $C_n^{v_b}$ は本章(3)節に示す方法により求める。

計算格子内の建物による流体力を求める際には計算格子内の建物の占有率 $\gamma_o^{v_b}$ と代表長さ $l_o^{v_b}$ を求める必要がある。計算格子内の建物の占有率 $\gamma_o^{v_b}$ は、計算格子内の個々の建物の体積の総和とその計算格子との体積の比により求まる。また個々の建物の体積は、その計算格子内の建物の占有面積 $P_n^{v_b}$ と高さ方向の長さ $dh_{n,k}^{v_b}$ の積により求めることができる。建物の高さ方向の長さ $dh_{n,k}^{v_b}$ は、土地利用の場合と同様に、式(41)の添え字 r 及び m をそれぞれ v_b 、 n に置換し求める。この時の計算格子内の建物の占有率 $\gamma_o^{v_b}$ は次式により求める。

一方、代表長さ $l_o^{v_b}$ は計算格子内の流体力が個々の建物による流体力の総和からなると仮定された Maruyama²²⁾の式(16)と式(24)より次式のように求められる。

$$l_o^{v_b} = \frac{4V_u}{S_u} = \frac{4\sum_n P_n^{v_b} dh_{n,k}^{v_b}}{\sum_n C_n^{v_b} dh_{n,k}^{v_b}} \quad (47)$$

また、等価抗力係数 $C_f^{v_b}$ は、Maruyama²²⁾の抗力係数 $C_{D,u}$ より算出した式(26)の等価抗力係数を用いる。

$$C_f^{v_b} = \frac{1}{(1 - \gamma_o^{v_b})^3} \min\left(\frac{1.53}{(1 - \gamma_o^{v_b})}, 2.75(1 - \gamma_o^{v_b})\right) \quad (48)$$

以上のように、電子住宅地図に基づく建物群落は、式(46)に示す占有率 $\gamma_o^{v_b}$ 、式(47)に示す代表長さ $l_o^{v_b}$ 及び、式(48)の等価抗力係数 $C_f^{v_b}$ によりモデル化する。

次に、植生に関するベクトル形式の詳細な電子地図を利用する場合の一般化キャノピーモデルのパラメータの算出方法について述べる。電子住宅地図を利用する場合には、個々の建物形状からパラメータを求めるが、植生に関しては、その最小構成要素である葉の長さスケールが解析スケールに比べ十分に小さいため、植生の領域内の障害物の分布は均一であると考えられる。ここで想定する電子地図は、表-4に示した土地利用データと同様に、樹種 τ 、樹高 $h_{\tau}^{v_p}$ 、抗力係数 $C_{f,\tau}^{v_p}$ 、占有率 $\gamma_{o,\tau}^{v_p}$ 、代表長さ $l_{o,\tau}^{v_p}$ が定義された多角形で表される生息域が収録されている。図-7に示したようにベクトル形式の植生データは、任意の生息域をインデックス t ($t = 1, \dots, T$) で表し、その生息域を示す水平占有面積 $P_t^{v_p}$ の多角形を底面に持つ、高さ $h_{\tau}^{v_p}$ の柱状体としてモデル化し、土地利用の場合と同様に扱う。なお水平占有面積 $P_t^{v_p}$ は本章(3)節の方法により算出する。各生息域を示す柱状体の占有率 $\gamma_{o,t}^{v_p}$ 、代表長さ $l_{o,t}^{v_p}$ 、抗力係数 $C_{f,t}^{v_p}$ は土地利用の場合と同様に求める。

$$\gamma_{o,t}^{v_p} = \frac{dh_{t,k}^{v_p}}{dz_k} \gamma_{o,\tau_t}^{v_p} \quad (49)$$

$$l_{o,t}^{v_p} = l_{o,\tau_t}^{v_p} \quad (50)$$

$$C_{f,t}^{v_p} = C_{f,\tau_t}^{v_p} \quad (51)$$

生息域の柱状体の鉛直方向の長さ $dh_{t,k}^{v_p}$ は、土地利用の場合と同様に、式(41)の添え字 r 及び m をそれぞれ v_p 、 t に置換し求める。同一計算格子内に異なる樹種が混在する場合や建物と植生が混在する場合については本章(4)節にて述べる。

(3) 計算格子内の占有面積と周囲長の算定

建物や植生が計算格子の境界に位置する場合には、そ

これらの形状を計算格子の境界線により分割し、各計算格子内における建物や植生の占有面積 P_n^b 、 P_t^v や周囲長 C_n^b を求める必要がある。また、土地利用の占有面積 P_m^r に関しても同様に、計算格子ごとに求める必要があり、多角形領域の計算格子の境界による分割が必要となる。本研究では計算格子境界線上に位置する多角形を Sutherland and Hodgman⁴⁷⁾の方法(以下 SH 法)により分割し、計算格子内における多角形の占有面積と周囲長を求めた。

図-8 には SH 法により多角形を分割する例を示す。ここで対象となる多角形を入力多角形、計算格子をクリッピングウィンドウ、最終的に計算格子内部に残る多角形を出力多角形と呼ぶ。SH 法ではクリッピングウィンドウの各辺に対し入力多角形の各頂点がクリッピングウィンドウの内側に存在するか外側に存在するかを判定し、クリッピングウィンドウの内側に位置する入力多角形の頂点や境界に位置する入力多角形とクリッピングウィンドウとの交点を抽出し出力多角形を構成してゆく。その際の処理として境界と入力多角形を構成する頂点との位置関係から図-9 に示した 4 ケースが考えられる。図-9 では入力多角形の各辺を反時計周りに走査する様子を表し、s は入力多角形の任意の辺の始点、p はその終点を示す。Case1 では入力多角形の辺を構成する 2 つの頂点 s と p がいずれもクリッピングウィンドウの内側に位置しており、出力多角形にはこれら 2 つの頂点を加える。Case2 では入力多角形の辺を構成する始点 s が内側、終点 p が外側に位置しているため、境界との交点 c を求め s と c のみを出力多角形に加える。Case3 では入力多角形の辺を構成する 2 つの頂点 s と p がいずれもクリッピングウィンドウの外側に位置しており、出力多角形にはいずれの点も加えない。Case4 では入力多角形の辺を構成する始点 s が外側、終点 p が内側に位置しているため、境界との交点 c を求め c と p を出力多角形に加える。一連の多角形上の走査を図-8 のようにクリッピングウィンドウの辺の数だけ繰り返し最終的に出力多角形を得る。本研究ではこの手法を建物形状、建物群落領域、植生領域を表した多角形に適用し、計算格子により分割された多角形領域の占有面積や周囲長などを求め、流体力の算出に用いる。

(4) 異なる障害物が混在する場合の流体力の定式化

実際の地表面には植生や建物が混在しており、同一計算格子内に異なる種類の障害物が存在する場合の流体力を算出する方法を定める必要がある。そこでまず、異なる土地利用が混在する場合の流体力の算出方法を述べる。次に、電子地図の建物及び植生が混在する場合の流体力の算出方法を述べる。なお、本研究では、建物及び植生のベクトル形式の電子地図が得られている場合、該当す

る範囲におけるキャノピーモデルのパラメータは精度の高いベクトル形式の電子地図情報により算出する。

ここで、まず土地利用の占有面積比 η_m^r を次式により定義する。

$$\eta_m^r = \frac{P_m^r}{S_{\text{grid}}} \quad (52)$$

ここで、 S_{grid} は計算格子の水平断面積、 P_m^r は土地利用の水平占有面積である。Kimura³⁷⁾の研究によると、異なる種類の土地利用が同一計算格子内に存在する場合、計算格子における総フラックスは各種土地利用のフラックスの占有面積比による加重和から求めるのが最適とされている。そこで、本研究では流体力に関し同様な考えを適用し、計算格子内の単位体積当りの流体力 $f_{u,i}^r$ を次式により算出する。

$$f_{u,i}^r = \left(\sum_m \eta_m^r C_{f,m}^r \frac{\gamma_{o,m}^r}{l_{o,m}^r} \right) \frac{\rho}{2} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (53)$$

ここで、計算格子内のいずれの位置においても風速は一定とし、風速の代表値を平均風速 \bar{u}_i と仮定した。

次に、建物、植生の両方に関し電子地図を用いる場合の流体力の算出方法について述べる。建物に関しては、本章(2)節に示したパラメータにより流体力 $f_{u,i}^b$ を求める。一方、植生に関しては土地利用データの場合と同様に、各データに基づく柱状体による流体力を Kimura³⁷⁾の方法に倣い、水平面積比 η_m^v を乗じ、和をとり計算格子内の植生による流体力 $f_{u,i}^v$ を算出する。計算格子の単位体積当りの流体力 $f_{u,i}^v$ は、それらの和とする。

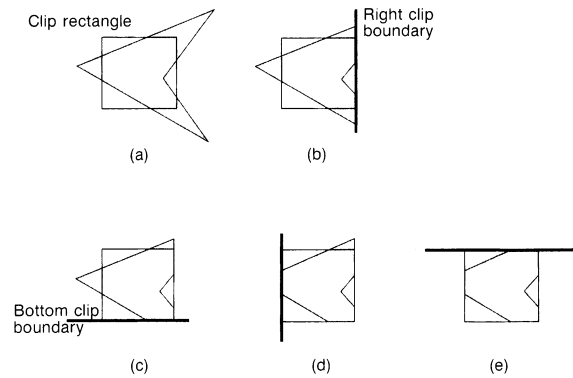


図-8 建物形状の格子による分割⁴²⁾

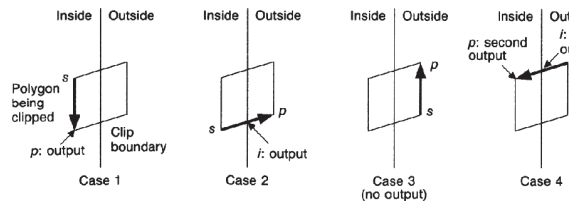


図-9 Sutherland and Hodgman 法のクリッピングウィンドウ境界における内外の判定と境界上の交点の処理⁴²⁾

$$f_{\bar{u},i}^v = f_{\bar{u},i}^{v_b} + f_{\bar{u},i}^{v_p} \\ = C_f^v \frac{\gamma_o^{v_b}}{l_o^{v_b}} \frac{\rho}{2} |\bar{u}| \bar{u}_i + \sum_t \left(\eta_t^{v_p} C_{f,t}^{v_p} \frac{\gamma_{o,t}^{v_p}}{l_{o,t}^{v_p}} \right) \frac{\rho}{2} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad (54)$$

ここで、占有率 $\gamma_{o,t}^{v_p}$ は式(49)、代表長さ $l_{o,t}^{v_p}$ は式(50)、抗力係数 $C_{f,t}^{v_p}$ は式(51)より求め、水平面積比 $\eta_t^{v_p}$ は土地利用の場合と同様に、式(52)の添え字 r 及び m を、それぞれ v_p 、 t に置換し求める。なお、建物の領域の計算格子に対する面積比が陽には現れてはいないが、 $f_{\bar{u},i}^{v_b}$ は各領域に関して求められた流体力ではなく、計算格子の単位体積あたりの流体力である。結果的に、式(54)は建物、植生の占有面積比による加重和を表している。

実際の解析には、これまでに示した土地利用やベクトル形式の建物、植生ごとにパラメータを保持することは非効率である。そこで、式(16)で示した形式により、各計算格子を代表する等価抗力係数 C_f 、占有率 γ_o 、代表長さ l_o の3つのパラメータでまとめて記述する。まず、土地利用データ(以下、式中では *raster* と表記する)もしくは電子地図(以下、式中では *vector* と表記する)を用いる場合、計算格子全体の単位体積当りの流体力 $f_{\bar{u},i}$ は次式で表される。

$$f_{\bar{u},i} = \begin{cases} f_{\bar{u},i}^r & (raster) \\ f_{\bar{u},i}^v & (vector) \end{cases} \quad (55)$$

ここで、計算格子内の占有率 γ_o は定義より、計算格子内の障害物の体積の和と計算格子体積の比であり、

$$\gamma_o = \begin{cases} \sum_m (\eta_m^r \gamma_{o,m}^r) & (raster) \\ \gamma_o^{v_b} + \sum_t (\eta_t^{v_p} \gamma_{o,t}^{v_p}) & (vector) \end{cases} \quad (56)$$

と表される。一方、異なる障害物が混在する時の代表長さ l_o と等価抗力係数 C_f の関係は式(55)のみにより定められているため、一意には決まらない。そこで、異なる障害物が混在する時の代表長さ l_o を、計算格子内に存在する障害物により生成する乱流のスケールを代表する量と定義し、計算格子内の全障害物の代表長さ $l_{o,m}^r$ 、 $l_o^{v_b}$ 及び $l_{o,t}^{v_p}$ の最大値をとり、次式により定義する。

$$l_o = \begin{cases} \max(l_{o,m}^r) & (m = 1, \dots, M) \quad (raster) \\ \max(l_o^{v_b}, l_{o,t}^{v_p}) & (t = 1, \dots, T) \quad (vector) \end{cases} \quad (57)$$

その結果、等価抗力係数 C_f は式(16)、式(55)、式(56)及び式(57)より次のようになる。

$$C_f = \begin{cases} \frac{l_o}{\gamma_o} \left(\sum_m \eta_m^r C_{f,m}^r \frac{\gamma_{o,m}^r}{l_{o,m}^r} \right) & (raster) \\ \frac{l_o}{\gamma_o} \left[C_f^{v_b} \frac{\gamma_o^{v_b}}{l_o^{v_b}} + \sum_t \left(\eta_t^{v_p} C_{f,t}^{v_p} \frac{\gamma_{o,t}^{v_p}}{l_{o,t}^{v_p}} \right) \right] & (vector) \end{cases} \quad (58)$$

最終的に異なるデータ形式の障害物が混在する場合、

占有率を式(56)、代表長さを式(57)、等価抗力係数を式(58)により求め、単位体積当りの流体力を式(16)により算出する。

なお、表-4に示すように土地利用データを用いる場合も電子地図データを用いる場合も、地表面境界条件には、建物及び植生の土地利用種別(建物用地A及びB、森林、果樹園)の地表面粗度長を一律に荒地の地表面粗度長とし算定した地表面せん断力を与える。一方、地表面粗度によりモデル化した土地利用種別は、地表面せん断力を地表面の境界条件²⁶⁾として与え、流れ場への影響を考慮する。なお、異なる土地利用が同一計算格子内に混在する時は、計算格子内の総せん断力は各土地利用のせん断力の面積比による加重和から求め、境界条件として用いる。

本研究では、流体力の定式化について風方向のみ示したが、同様な式を風直角方向の流体力にも適用可能である。なぜなら、計算格子内における抗力係数 C_f 、代表長さ l_o 、占有率 γ_o は風向によらず一定と仮定した場合、以下の関係が成り立つからである。

$$\frac{1}{2} \rho U^2 C_f \frac{\gamma_o}{l_o} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_1^2 C_f \frac{\gamma_o}{l_o} + \frac{1}{2} \rho \bar{u}_2^2 C_f \frac{\gamma_o}{l_o} \quad (59)$$

ここで、 U は水平方向流速の大きさ、 \bar{u}_1 、 \bar{u}_2 はそれぞれ x 方向、 y 方向の流速成分である。

このように、土地利用及び建物や植生に関するデータベースを本研究で提案された一般化キャノピーモデルのパラメータに変換すれば、解析モデルを変更することなく、市街地から個々の建物までの気流解析を任意の分解能で行うことが可能となる。

4. 一般化キャノピーモデルの検証

本研究で提案した一般化キャノピーモデルの適用可能性と予測精度を検証するために、占有率が大きく異なる3つの流れ場を解析し、実験結果との比較を行う。まず、占有率の低い樹木を対象に解析を行い、黒谷ら⁴³⁾により行われた野外実験と比較することにより、その再現性を調べる。次に、Maruyama²²⁾による3種類の均一な密度を持つ街区内外の流れ場を解析し、風洞実験と比較することにより、本研究のキャノピーモデルの予測精度を検証する。最後に、占有率が100%の角柱を対象に解析を行い、石原と日比⁴⁵⁾により測定された角柱周辺の平均速度及び乱流エネルギーと比較することにより、本モデルの高占有率流れ場への適用可能性を立証する。

(1) 樹木後方の気流予測

まず、本研究で提案した一般化キャノピーモデルを用いて図-10に示す防風林(クロマツ)後方の流れ場⁴³⁾を解析した。移動式測風塔により風速の測定が行われ、図-10

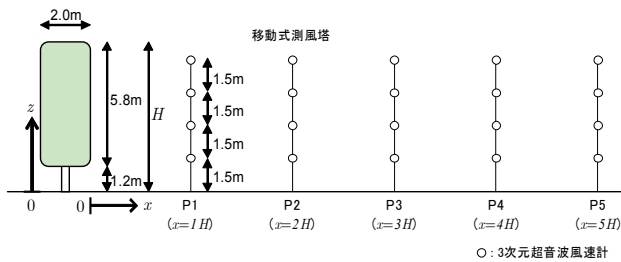


図-10 対象樹木と測風塔の概要

表-6 流入条件

風速	$\bar{u} = U_b(z/H_b)^{0.229}$ $U_b = 5.6 \text{ (m/s)}, H_b = 9 \text{ (m)}$
乱流エネルギー k	$k = 3.02 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ 一定値
逸散率 ε	$\varepsilon = 0.3k(\partial\bar{u}/\partial z)$

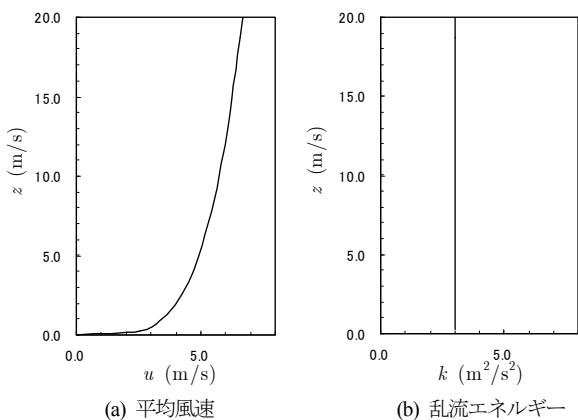


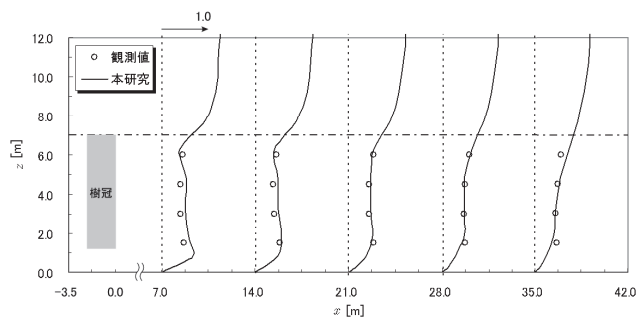
図-11 流入風の鉛直分布

中の白丸の点で観測値が得られている。解析に用いた植生の抗力係数 $C_{D,t}$ 及び葉面積密度 a_t はそれぞれ 1.6, $1.17\text{m}^{-1.44}$ であり, 本研究で提案した流体力の形式に変換すると, 葉厚 $l_o = 1.0 \times 10^{-3}\text{m}$ と仮定した場合, 占有率 $\gamma_o = 1.17 \times 10^{-3}$, 等価抗力係数 $C_f = 1.6$ となる。本研究で提案した乱流モデルの係数は式(37), 式(39)より $\beta_d = 4.0$, $C_{pe2} = 0.7$ となる。なお, 樹冠内に位置する計算格子には樹木の水平面積比 $\eta_t^{vp} = 1.0$ を設定した。流入風に関しては鈴木ら⁴⁴⁾が実測に基づき求めた式(表-6)を用いて算出し, 図-11 に示した。逸散率 ε は局所平衡仮定を用い, 次式で設定した。

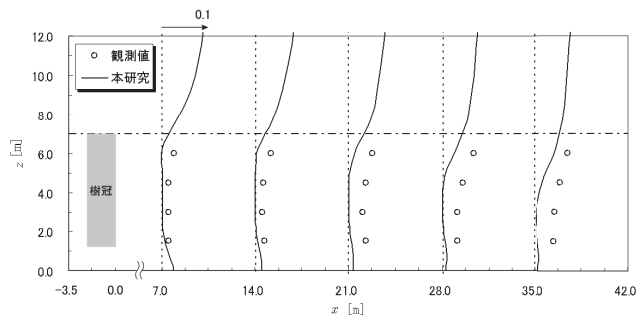
$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (60)$$

なお, 地表面の境界条件は一般化対数則を満足するように地表面粗度を 0.0858m と設定した。

図-12 には予測と実測された平均風速及び乱流エネルギーを示す。白丸が実測値, 実線は予測値, 点線は樹木高さ(7.0m)を示している。図中の値は, それぞれ樹木高における流入風速(5.3 m/s)及びその二乗値で無次元化されている。乱流エネルギーの予測値は $x/H = 3 \sim 5$ の



(a) 無次元平均風速



(b) 無次元乱流エネルギー

図-12 樹木後方の無次元平均風速及び無次元乱流エネルギーの予測値と観測値との比較

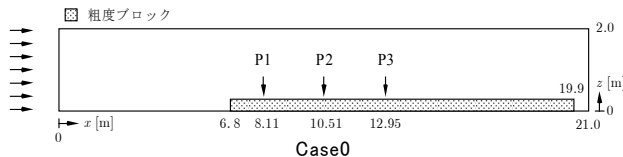


図-13 実験概要と気流計測点の位置

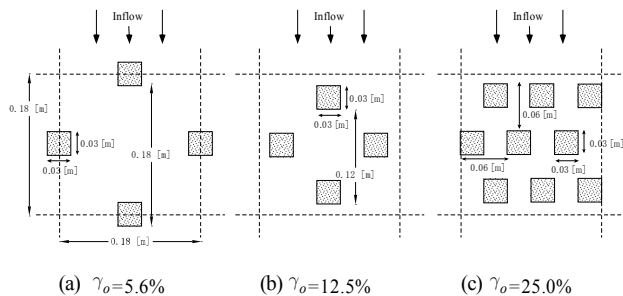


図-14 3種類の粗度ブロック配置と計算格子

後方領域で若干過小評価の傾向にあったが, 風速の鉛直分布は樹木による遮蔽効果を再現し実測とよく一致しており, 占有率が低い樹木後方の流れ場は本手法により再現できることが示された。

(2) 建物群落内外の気流予測

次に, 建物群落の流れ場を予測し, Maruyama²²⁾により実施された3種類のブロックを用いた風洞実験との比較を行った。実験では主流方向 21.0m × 高さ 2.0m × 幅 2.5m の風洞内に図-13 に示すようにブロックを敷き詰め, P1, P2, P3 の位置で平均風速と乱流エネルギーの計測が行わ

れた。図-14には占有率の異なる3種類(占有率 $\gamma_o=5.6\%$, $\gamma_o=12.5\%$, $\gamma_o=25.0\%$)のブロックの配置と計算格子(図中の破線)を示す。また解析条件は表-7に示し、水平方向には0.18m, 鉛直方向には最小間隔が5mmの計算格子を用いた。図-15に解析に用いた流入風の鉛直分布を示す。平均風速と乱流エネルギーの値はMaruyama²²⁾により求められた値を用いた。逸散率 ε は式(60)により算出した。解析に用いる抗力係数 C_f は式(26), 長さスケール l_o は式(24)を用いて算出した。キャノピー層内の流体における物理量は計算格子の平均値から式(6)により求める。

図-16には主流方向平均風速を示す。白点の実験値, 実線は解析結果である。実験値, 解析値共に $z=0.7$ mにおける平均風速により無次元化されている。また破線はブロックの高さを示している。占有率が高くなるほど平均風速が低減することをよく再現している。キャノピー

表-7 解析条件

解析領域	x 方向21.0m× z 方向2.0m
最小格子間隔	x 方向180mm, z 方向5mm
床面粗度	$z_0 = 7.0 \times 10^{-5}$ m
粗度ブロック形状	立方体, 一辺30mm
占有率 γ_o	5.6%, 12.5%, 25.0%

層内の予測値は, 占有率12.5%及び25%のケースで実験値より若干小さいが, キャノピー層内の平均風速の予測値が実験値より小さい理由の1つとしてはキャノピー層内の建物の周りに流れの剥離が発生し熱線風速計により測定されている値が過大評価されていることが挙げられる。キャノピー層上部の平均風速は精度よく予測されていることがわかる。図-17には乱流エネルギーの予測結果を示す。乱流エネルギーの観測値, 解析値は基準風速の二乗値で規格化している。占有率12.5%のケースでは,

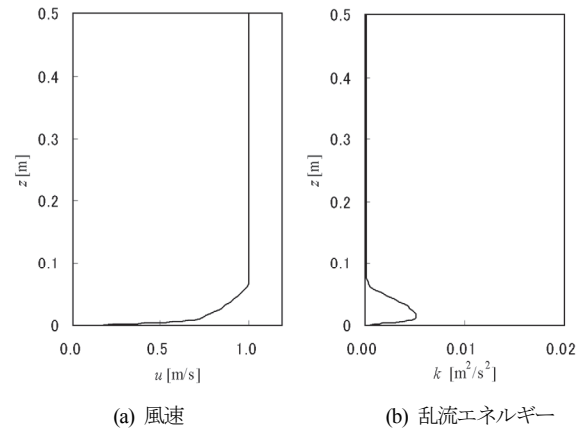
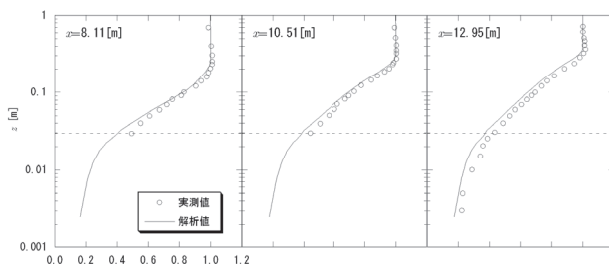
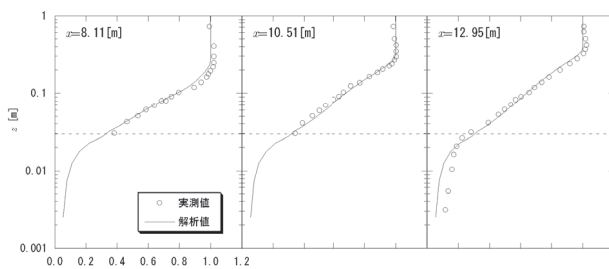


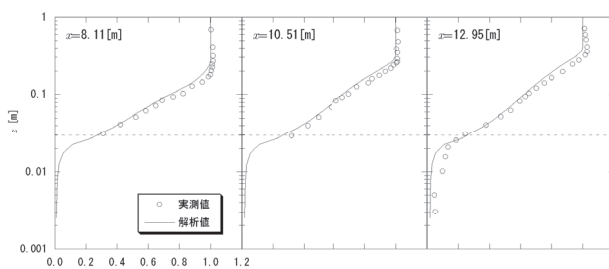
図-15 キャノピー層解析に用いた流入風



(a) $\gamma_o = 5.6\%$

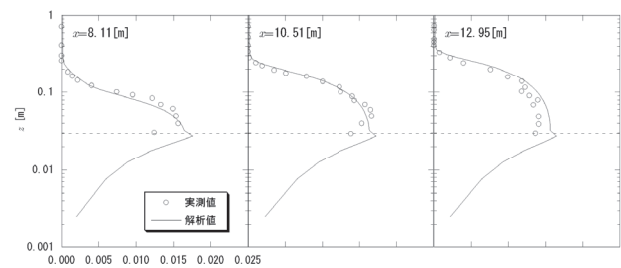


(b) $\gamma_o = 12.5\%$

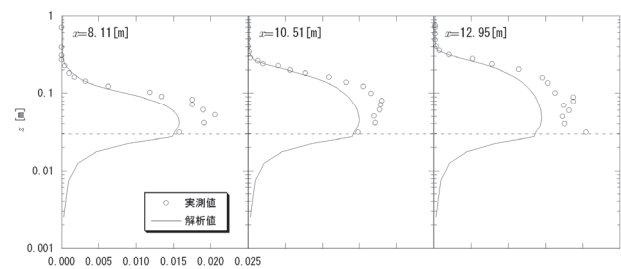


(c) $\gamma_o = 25.0\%$

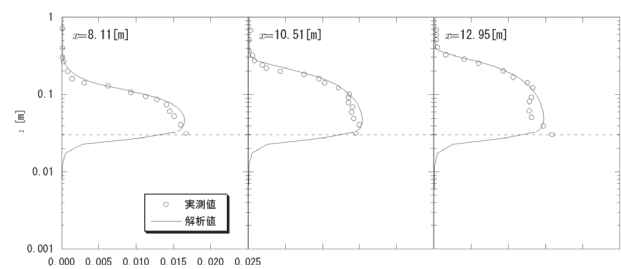
図-16 無次元平均風速の予測値と実測値²²⁾との比較



(a) $\gamma_o = 5.6\%$



(b) $\gamma_o = 12.5\%$



(c) $\gamma_o = 25.0\%$

図-17 無次元乱流エネルギーの予測値と実測値²²⁾との比較

乱流エネルギーがキャノピー層上部において若干過小評価されているものの、全体的には高い予測精度を示している。

(3) 単体建物周りの気流予測

最後に、石原と日比⁴⁵⁾により測定された角柱周辺の流れ場を解析し、本モデルの高占有率流れ場への適用可能性を検証する。図-18には解析対象の単体建物モデルと計算格子を示す。建物モデルは縦、横、奥行きの比が2:1:1の角柱であり、角柱の幅 b は0.08mである。計算領域の x 方向、 y 方向、 z 方向はそれぞれ $21.0b$ 、 $13.75b$ 、 $11.25b$ である⁴⁵⁾、⁴⁶⁾。角柱近傍の最小格子間隔は鉛直方向に $0.05b$ 、水平方向に $0.07b$ である(図-18(b), (c))。流入風の平均風速と乱流エネルギーの鉛直分布を図-19に示す。

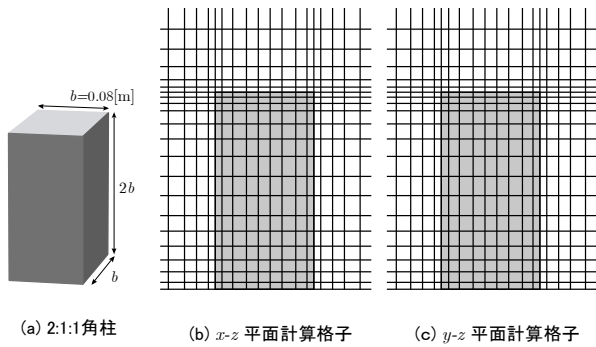


図-18 解析対象の角柱と計算格子

す。逸散率 ε は式(60)により算出した。計算領域の底面は風洞実験から求められた床面の粗度長 $z_0=1.8 \times 10^{-4}m$ を用いた。角柱表面には境界条件の設定はしない。計算領域内で角柱と重なる位置の計算格子に、式(4)及び式(18)より占有率 γ_0 及び代表長さ l_0 を設定し、抗力係数を式(26)により算出し解析した。

図-20と図-21はそれぞれ鉛直と水平断面における平均風速及び乱流エネルギーの実測値との比較結果を示す。各図中の黒い破線は基準線($x/b = -0.75, -0.5, -0.25, 0.0, 0.5, 0.75, 1.25, 3.5$)を示す。白丸は実測値、実線は本研究の一般化キャノピーモデルによる予測結果を示す。図-20から分かるように平均風速の予測値は後流領域で若干過少評価されるものの、角柱周辺における鉛直断面、

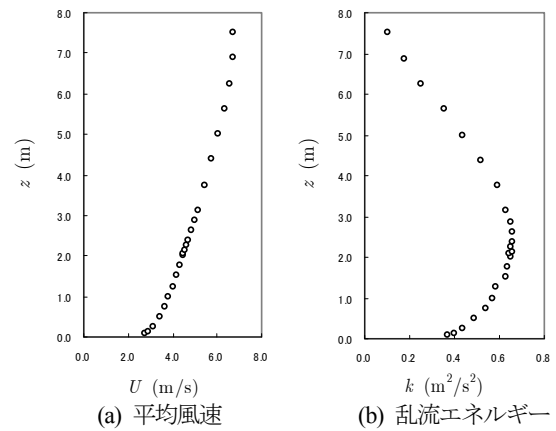


図-19 流入風

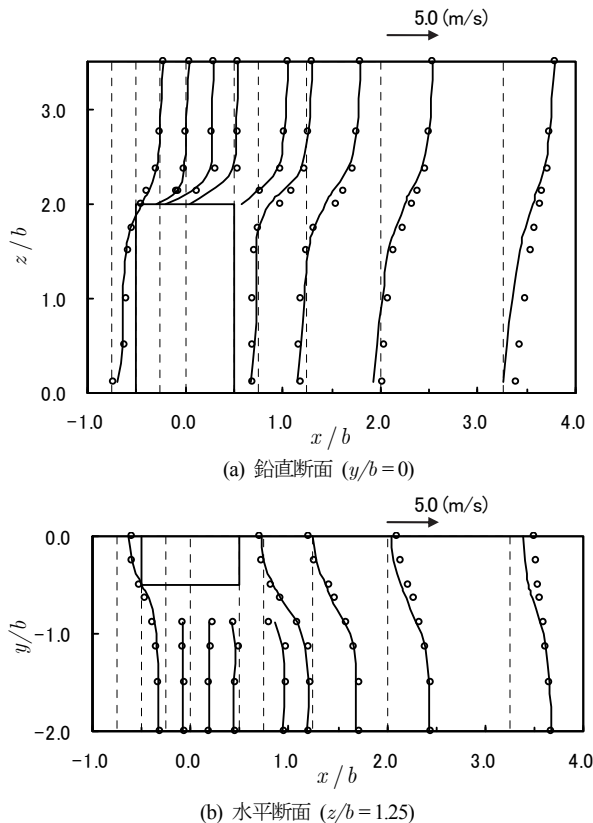


図-20 角柱周りの平均風速の予測値と実験値⁴⁵⁾との比較

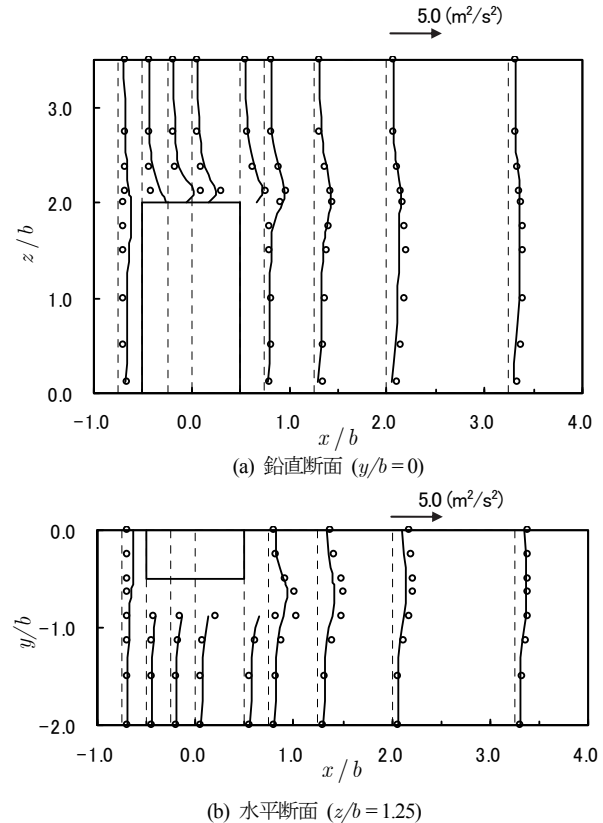


図-21 角柱周りの乱流エネルギーの予測値と実験値⁴⁵⁾との比較

水平断面においては実測値と一致している。また図-21から角柱前面と角柱周辺の乱流エネルギーは実験値とよく一致していることが分かる。本研究で提案したキャノピーモデルにより角柱周辺の境界条件を設定することなく従来の数値流体解析手法と同程度の精度で建物周りの流れ場が予測可能であることが示された。

5. 市街地の風況予測への応用

本章では、本研究で提案した一般化キャノピーモデルの有用性と予測精度を検証するため、実際の市街地を対象に気流解析を実施し、気象庁の風観測結果との比較検討を行う。

(1) 対象市街地の概要

対象市街地としては図-22に示す東京都江東区新木場の東京ヘリポート内にある気象庁新木場アメダスを選定した。図-23には新木場アメダスの周辺図を示す。南側は若洲公園であり、標高20m程度の小高い丘である。さ



図-22 新木場アメダスの概観



図-23 新木場アメダス周辺の建物状況

らに南方には東京湾が広がる。また西側は倉庫街と貯木場が混在し、地形は平坦である。一方、東側は荒川の河口に面している。西から北にかけて市街地と水面からなる複雑な地表状態になっている。

表-8には、新木場アメダスの概要を示す。観測気象要素は降水量、気温、風速、風向である。風観測塔は地上高さ18.2mに位置し、2002年4月から2003年3月までの年平均風速は4.26m/sであり、周辺の東京地方気象台の年平均風速3.25m/s(観測高74.5m)や千葉測候所の年平均風速4.09m/s(観測高さ47.9m)などと比較すると幾分高い値を示している。これは新木場アメダスが東京湾の埋立地であるヘリポート内にあり、東から南寄りの風への建物の影響が比較的少ないことと南北風向の風が卓越していることが主な要因として挙げられる。

(2) 対象市街地における気流解析

本研究では、建物位置情報、形状データ、建物階数に関する情報を(株)ゼンリンの発行する電子地図「Zmap-Town 2 江東区」³⁸⁾から読み取り第3章に示す方法によりキャノピーモデルの占有率 γ_0 、代表長さ l_0 、等価抗力係数 C_f を式(56)、式(57)、式(58)を用いて求めた。図-24には新木場アメダス周辺の建物の占有面積を示している。この図から分かるように、水平解像度20mを用いる場合には、計算格子の面積は400m²であり、建物占有面積は200m²を超える計算格子、すなわち、計算格子内の建物占有率が50%を超えていることを意味する。

表-8 新木場アメダスの概要

項目	詳細情報
緯度経度 (世界測地系)	北緯35° 38' 8.7" 東経139° 50' 14.2"
海面上高さ	5.0 m
風速計地上高さ	18.2 m
観測気象要素	降水量、気温、風速、風向

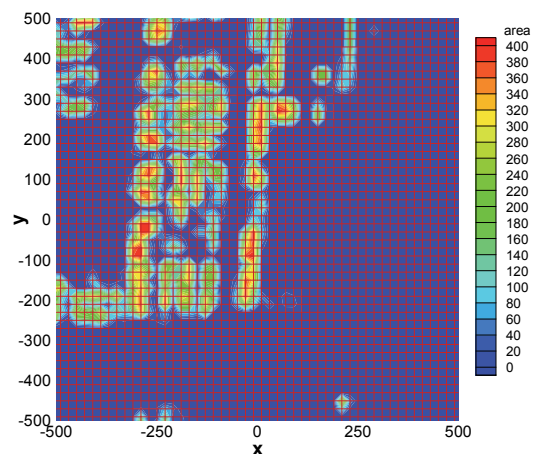


図-24 対象市街地1km四方内の建物の占有率の分布

本研究では新木場アメダスを中心とする水平距離5.0kmの範囲の気流解析を行った。気流解析条件の詳細を表-9に示す。計算領域の上面は固定値(流入風の値)、側面には対称境界、流出部には勾配ゼロの境界条件を課している。地表面境界条件は土地利用データ³⁶⁾をもとに表-4により地表面の粗度長を設定した。鉛直方向の最下格子に障害物が存在する場合は、地表面より受けるせん断応力を地表面粗度長により、格子内障害物による体積力を一般化キャノピーモデルにより算出した。また最下格子における乱れの地表面境界条件は局所平衡を仮定しており、キャノピー内乱流モデルは考慮していない。本研究では電子住宅地図を用いるため表-4に示した建物用

表-9 気流解析条件

項目	詳細情報
解析風向	16 方位
標高データ	国土地理院発行の数値地図 (50m メッシュ)
土地利用データ (地表面粗度)	国土地理院発行の1/10 細分区画 土地利用データ(100m メッシュ)
建物形状データ	(株)ゼンリン Zmap-Town2 江東区
解析対象領域	5000m×5000m×1500m(x, y, z 方向)
最小格子間隔	水平方向20m, 鉛直方向7.0m
格子数	約215万メッシュ(317×282×24)
解析中心 (世界測地系)	北緯35度38分8.7秒 東経139度50分14.2秒

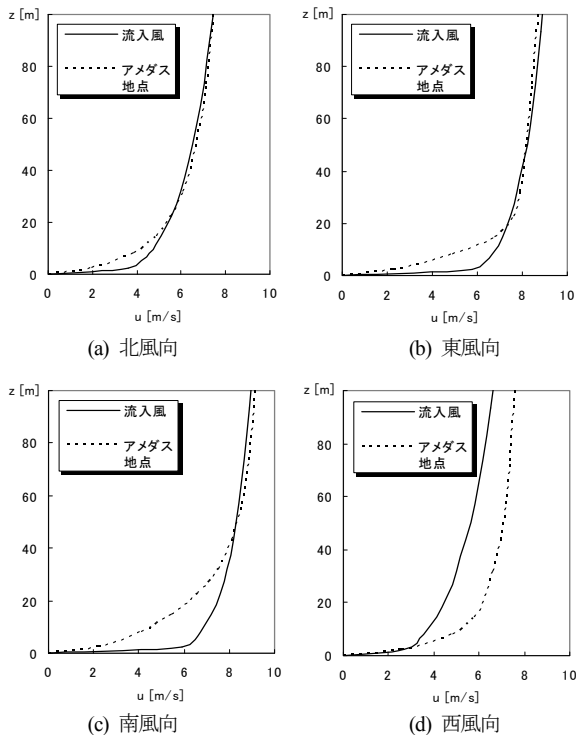


図-25 新木場アメダス風観測塔地点での風向別平均風速と流入風との比較

地A及びBのデータは使用せず、該当位置には荒地の粗度長 $z_0=0.03m$ の地表面境界条件を設定した。建物に関しては電子住宅地図を利用し第3章に示す方法により一般化キャノピーモデルのパラメータを直接求めた。また解析領域の周囲には緩衝領域を設定した²⁶⁾。各風向の解析では、解析領域の中心から約8km上流位置に流入部の地表面粗度長に対応する流入風を与え、計算領域の上方全面($z=1500m$)において風速を10m/sに設定した。

図-25には代表的な4つの風向における流入風と新木場アメダス風観測塔位置での風速の鉛直分布の比較を示す。北風向(図-25(a))は、建物群落による境界層が発達しており、近傍建物による減速効果が高度20m以下のみに現れている。東風向(図-25(b))では、北風向とほぼ同様に周辺の建物の影響が地表面近傍で顕著に現れている。一方、南風向(図-25(c))では対象地点の南方約200mの範囲に広がる建物群による境界層の発達を確認できる。また西風向(図-25(d))では、上流部の広い範囲が海面のため、アメダス位置での風速は大きくなっていることが分かる。このように本研究で提案したモデルを用いれば、広域に分布する各種土地利用と対象地点近傍の建物が流れ場を与える影響を考慮した予測が可能である。

(3) 風観測データとの比較

風観測データと比較するために、新木場アメダス地点における風向別風速出現頻度と風向別年平均風速を山口ら⁴⁸⁾により提案された力学統計的局所化手法により求めた。具体的には、まず2002年度を対象期間としてメソスケール気象モデルにより1年間の気象解析を行い、2km

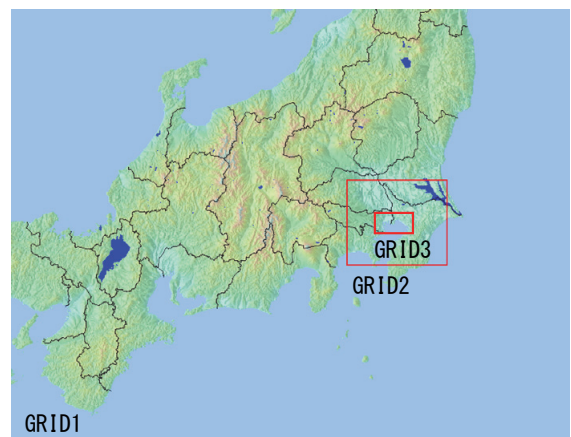


図-26 気象モデルの解析領域の概要

表-10 気象モデルの解析領域

解析領域	領域サイズ (経度方向×緯度方向)	水平解像度
GRID1	696km×552km	8km
GRID2	124km×108km	4km
GRID3	46km×26km	2km

分解能を有する風速・風速の時系列データの風況を求め予測し、統計解析により地域風況を算出する。次に、一般化キャノピーモデルにより得られた気流場を用い、地域風況から新木場アメダス地点における局所風況に変換する。

本研究では気象解析はメソスケール気象モデルRAMS⁴⁹⁾を用い、境界条件はヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の6時間ごとの客観解析値を内挿して用いた。図-26には気象モデルの解析領域を示し、3段にネスティングされた計算格子を用いた。表-10には解析領域の詳細を示す。東東南部～近畿を含む領域(GRID1)に8kmメッシュ、関東平野南部～東京湾を含む領域(GRID2)に4kmメッシュ、東京湾奥沿岸を含む領域(GRID3)に2kmメッシュを用いて解析を行った。

メソスケール気象モデルにおけるGRID3の計算格子のうち、新木場アメダスに最も近い点は直線距離で約210m南方に離れた標高14.31mの(x8,y7,z2)の計算格子点であり、その計算格子点における地域風況から力学統計的局所化手法⁴⁸⁾により新木場アメダス地点における局所風況を求めた。

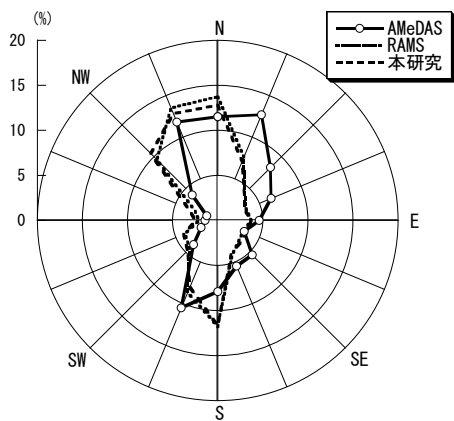


図-27 新木場アメダスにおける風向別風速の出現頻度

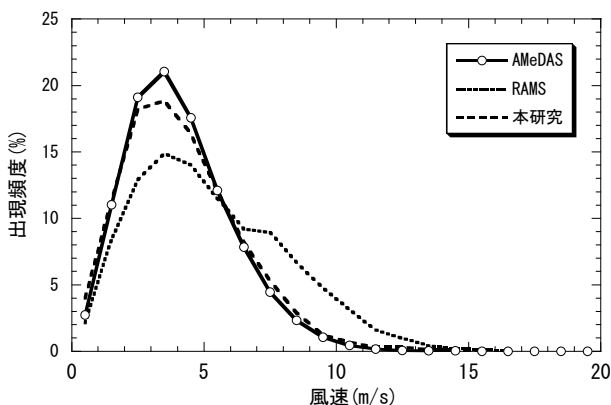


図-28 新木場アメダスにおける風速階級別風速の出現頻度

図-27 と図-28 には新木場アメダスにおける風向別風速の出現頻度と風速階級別の風速出現頻度の観測値とメソスケール気象モデルによる予測値およびアメダス地点における局所風況の予測値の比較を示す。図-27 から分かるように、風向別風速出現頻度は北側のピークが1方位西側へシフトしているものの、両予測モデルは観測結果をほぼ再現している。一方、風速階級別出現頻度では建物群落の効果を考慮したアメダス地点における局所風況の予測値は観測値とよく一致しているのに対し、メソスケール気象モデルによる予測値は観測値に比べ過大評価していることが分かる。図-29 は風向別の年平均風速を示す。メソスケール気象モデルでは水平解像度が2kmと粗いことに加え、都市キャノピーの効果を十分に再現できていないために、北北東から西北西にかけて年平均風速が観測値よりも高いことが分かる。一方、本研究で提案された一般化キャノピーモデルを用いた場合には風向別年平均風速が観測値とほぼ一致する結果となり、都市建物群による風速の低減効果の再現が重要であることが分かる。

表-11には2002年度に新木場アメダスで観測された年平均風速とメソスケール気象モデルによる予測結果、都市キャノピーの効果を考慮した本研究による予測結果を示す。年平均風速の予測誤差はメソスケール気象モデルの+23.94%から本研究の-1.9%に減少し、本研究で提案した一般化キャノピーモデルの有用性が示された。

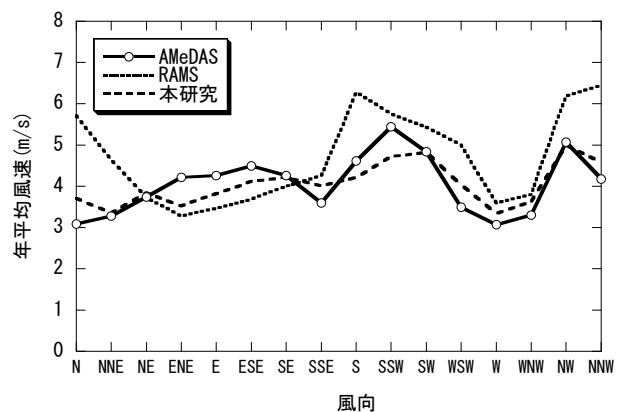


図-29 新木場アメダスにおける風向別年平均風速

表-11 新木場アメダスにおける年平均風速の予測結果

	年平均風速 (m/s)	予測誤差 (%)
観測値	4.26	-
RAMS	5.28	23.9
本研究	4.18	-1.9

6. まとめ

本研究では、都市域から街区、建物スケールまで任意の水平分解能を有する気流解析を実現するために、樹木だけでなく建物および建物群による影響を統一して考慮可能な一般化キャノピーモデルを構築し、以下の結論を得た。

- 1) 植生、建物群落による流体力を統一して表現可能な流体力モデルを提案したと共に、低占有率から高占有率までのキャノピー層内の気流を解析可能な乱流モデルを提案し、さまざまな種類の障害物を統一的に解析できる一般化キャノピーモデルを構築した。
- 2) 実都市内の気流解析を行うため、土地利用データ及び電子地図データにより一般化キャノピーモデルに必要なパラメータの算出方法を提案し、様々な障害物が存在する場合の流体力の定式化を行った。
- 3) 一般化キャノピーモデルを検証するため、低占有率の樹木の後方流れ場、中占有率の建物群落内外の流れ場、占有率 100%の建物周りの流れ場を解析し、実測及び風洞実験と比較した。本研究で提案した一般化キャノピーモデルにより求められた平均風速と乱流エネルギーは実測と風洞実験の結果とよく一致し、本モデルの有効性を示した。
- 4) 一般化キャノピーモデルの実都市域の風況予測への応用として、東京都江東区新木場アメダス地点における年間風況予測を行った。メソスケール気象モデルによる年平均風速の予測誤差が 23.9%であったのに対して、本研究で提案したモデルを適用することにより予測誤差が-1.9%に低下した。

参考文献

- 1) 風工学研究所：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，2005。
- 2) 川口正明：強風災害の発生と被害に関する統計，風災害フォーラム「強風災害の変遷と教訓—21世紀を前に—」，2000。
- 3) 石原孟，銘荊壯宏，高原景滋，又吉聖子，荒川洋：台風 0314 号の被害データと台風シミュレーションに基づく配電設備のリスクマネジメント その 1 配電様電柱の損傷度曲線の作成，日本風工学会誌，第 32 巻，第 2 号，pp.151-152，2007。
- 4) 朝日新聞：“強風，交通乱れる”，2009 年 3 月 14 日。
- 5) 村上周三，日比一喜，持田灯：Large Eddy Simulation による街区周辺の乱流場の 3 次元解析 その 1，日本建築学会計画系論文報告集，第 412 号，pp.1-10，1990。
- 6) Hunter, L. J., Watson, I. D. and Johnson, G. T.: Modelling Air Flow Regimes in Urban Canyons, *Energy and Buildings*, Vol.15-16, pp.315-324, 1990/91.
- 7) 田村哲郎，大野修，奥田泰雄，岡田恒：都市域における強風乱流の LES 解析モデルの提案，日本建築学会構

造系論文集，No.589，pp.49-57，2005。

- 8) Kanda, M.: Large-Eddy Simulations on the Effects of Surface Geometry of Building Arrays on Turbulent Organized Structures, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.118, pp.151-168, 2006.
- 9) Hirt, C. W.: Volume-fraction Techniques: Powerful Tools for Wind Engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.46 & 47, pp.327-338, 1993.
- 10) 片岡浩人，木梨智子，川口彰久：風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発，大林組技術研究所報，No.64，pp.49-54，2002。
- 11) 足永靖信，東海林孝幸，河野孝昭：地球シミュレータを用いた東京都心 10km 四方における高解像度のヒートアイランド数値解析，日本建築学会環境系論文集，第 616 号，pp.67-74，2007。
- 12) Oguro, M., Morikawa, Y., Murakami, S., Matsunawa, K., Mochida, A. and Hayashie, H.: Development of a wind environment database in Tokyo for a comprehensive assessment system for heat island relaxation measures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, pp.1591-1602, 2008.
- 13) Kondo, J. and Akashi, S.: Numerical Studies on the Two-Dimensional Flow in Horizontally Homogeneous Canopy Layers, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.10, pp.255-272, 1975.
- 14) Wilson, N. R. and Shaw, R. H.: A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.16, pp.1197-1205, 1977.
- 15) Yamada, T.: A Numerical Model Study of Turbulence Airflow in and above a Forest Canopy, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.60, No.1, pp.439-454, 1982.
- 16) Green, S. R.: Modeling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely Spaced Trees, *PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics and its Applications*, Vol.5, pp.294-312, 1992.
- 17) Liu, J., Chen, J. M., Black, T. and Novak, M. D.: E- ϵ Modeling of Turbulent Air Flow Downwind of a Model Forest Edge, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.77, pp.21-44, 1996.
- 18) Katul, G. G., Mahrt, L., Poggi, D. and Sanz, C.: One- and Two-Equation Models for Canopy Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.113, pp.81-109, 2004.
- 19) 岩田達明，木村敦子，持田灯，吉野博：歩行者レベルの風環境予測のための植生キャノピーモデルの最適化，第 18 回風工学シンポジウム，pp.69-74，2004。
- 20) Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S.: Numerical Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.49, pp.77-98, 1989.
- 21) 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, pp.1-9, 1989.
- 22) Maruyama, T.: Optimization of roughness parameters for staggered arrayed cubic blocks using experimental data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No.46 & 47, pp.165-171, 1993.
 - 23) 田村哲郎, 岸田岳士, 奥田泰雄, 中村修, 宮下康一: LESによる実在都市域での強風推定 孤立する高層建物を対象として, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.636, pp.215-223, 2009.
 - 24) 近藤裕昭: メソ気象解析からみたマイクロ解析との接続, 日本風工学会誌, Vol.31, No.2, pp.133-136, 2006.
 - 25) 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通風抵抗を考慮した新しい $k - \epsilon$ 型乱流モデルの提案 (その 6), 生産研究, 第 40 巻, 第 1 号, pp.67-70, 1988.
 - 26) 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.
 - 27) Kato, M. and Launder, B. E.: The Modeling of Turbulent Flow Around Stationary and Vibrating Square Cylinders, *Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto*, pp. 10.4.4-10.4.6, 1993.
 - 28) Counihan, J.: Wind Tunnel Determination of the Roughness Length as a Function of the Fetch and the Roughness Density of Three-Dimensional Roughness Elements, *Atmospheric Environment*, Vol.5, pp.637-642, 1971.
 - 29) Hussain, M. and Lee, B. E.: A Wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 6, pp.207-225, 1980.
 - 30) 石原孟, 老川進: 建物群落内における流れと拡散に関する実験的研究 その 1. 流れ場の測定, 大気環境学会誌, Vol.32, No.2, pp.136-147, 1997.
 - 31) 老川進, 石原孟: 建物群落内における流れと拡散に関する実験的研究 その 2. 拡散場の測定, 大気環境学会誌, Vol.32, No.2, pp.148-156, 1997.
 - 32) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一: 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, 日本建築学会環境系論文集, 第 578 号, pp.71-77, 2004.
 - 33) Finnigan, J.: Turbulence in Plant Canopies, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.32, pp.519-571, 2000.
 - 34) 持田灯, 遠藤芳信, 白澤多一, 義江龍一郎, 田中英之, 石田泰之: LES データを用いた高密度市街地内の運動エネルギー収支分析 (その 1) 建物高さのバラツキがエネルギー収支の主流方向分布と粘性逸散に及ぼす影響, 日本風工学会誌, 第 34 巻, 第 2 号, pp.123-124, 2009.
 - 35) 石田泰之, 遠藤芳信, 持田灯, 白澤多一, 義江龍一郎, 田中英之: LES データを用いた高密度市街地内の運動エネルギー収支分析 (その 2) 建物高さのバラツキが運動エネルギー収支の鉛直構造に及ぼす影響, 日本風工学会誌, 第 34 巻, 第 2 号, pp.125-126, 2009.
 - 36) 国土交通省: 国土数値情報, <http://www.mlit.go.jp>.
 - 37) Kimura, F.: Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.67, No.3, pp.401-409, 1989.
 - 38) 株式会社ゼンリン: 住宅地図データベース製品説明書, 2006.
 - 39) ESRI ジャパン株式会社: What is ArcGIS 9.2?, ESRI ジャパン株式会社, 2007.
 - 40) ESRI ジャパン株式会社: シェープファイルの技術情報, ESRI ホワイトペーパー・シリーズ, 2001.
 - 41) 足永靖信, 東海林孝幸: 東京 23 区の用途毎建物高さの集計, 空気調和・衛生工学会論文集, No.115, 2006.
 - 42) Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K. and Hughes, J. F.: *Computer Graphics: Principles and Practice 2nd Edition in C*, Addison-Wesley Publishing Company, 1997.
 - 43) 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.
 - 44) 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.
 - 45) 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.
 - 46) 日本建築学会: 市街地風環境予測のための数値流体解析ガイドブッカーガイドラインと検証用データベース, 2007.
 - 47) Sutherland, I. E. and Hodgman, G. W.: Reentrant Polygon Clipping, *Communications of the ACM*, Vol.17, No.1, pp.32-42, 1974.
 - 48) 山口敦, 石原孟, 藤野陽三: 力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証, 土木学会論文集, No.808/I-74, pp.147-162, 2006.
 - 49) Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H.: A comprehensive meteorological modeling system – RAMS, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.49, pp.69-91, 1992.

(2009. 11. 26 受付)

A GENERALIZED CANOPY MODEL AND ITS APPLICATION TO THE PREDICTION OF URBAN WIND CLIMATE

Kota ENOKI and Takeshi ISHIHARA

In this study, a generalized canopy model is proposed by the combination of a fluid force model to consider the drag forces caused by buildings and trees and a turbulence model to overcome inapplicability of the Green's turbulence model to the high packing density. This model can predict the flow field with arbitrary porosities in a contrast to the conventional models. Procedures for the calculation of the parameters in the proposed model based on the land use and digital map data are also described and a fluid force model counting drag forces caused by obstacles existing in the same grid is proposed for the flow field simulation in the urban areas. The proposed canopy model is verified by wind tunnel tests and the onsite measurement. The predicted flow fields around various obstacles with different porosities, such as a tree, a city area and a single building, show good agreements with the measurements. Finally, the wind speed at a meteorological station located in Tokyo city is simulated and the prediction error in the annual mean value is reduced from 23.9% by a meso-scale meteorological model to -1.9% by applying the proposed model.