

II-349

都市キャノピー層を考慮した都市境界層乱流モデル

国立公害研究所大気環境部 正員 ○鶴野伊津志、若松伸司
国立公害研究所大気環境部 植田洋匡

1. 緒言 本報では、晴天な夜間の郊外から都市中心部にかけて出現する都市境界層の乱流構造を明らかにする。都市境界層は都市上空における鋭い上空逆転層として特徴づけられ^{1,2)}、ヒート・アイランドの形成と大気汚染物質の拡散に重要な意味をもつ。このような都市境界層の形成に関与する要因としては、人間活動により発生する人工熱の寄与と都市の建築物により生じる機械的な乱流により安定層を崩壊させることが考えられる。

都市域のヒートアイランドに関する従来の数値モデルは、すべて地表面粗度 z_0 と平均排除厚さ d を用いているが、これはモデルの適用できる高度は $d+z_0$ の数倍からとなり、都市キャノピー層の外部となる。本研究では、都市キャノピー層を都市域の建築物による抵抗係数の概念によりモデル化し、地表面から適用可能な都市境界層乱流モデルを用いて、都市境界層内外の乱流特性を示す。また、その特性を観測データを用いて実証的に明らかにする。

2. 観測 1984年11月20日～21日に札幌市において実施した大型乱流ゾンデによる観測データを検証データとして利用する。観測は都心部と郊外での温度、風向・風速の垂直プロファイルの相違とその時間変化を中心に行った。これらの詳細は参考文献1)、2)を参照されたい。図1には、都心部と郊外での温度プロファイルの時間変化を示す。観測された都市境界層の高度は40～60mと都市の水平スケールに比較して極めて薄い。図2には都心部での乱流統計量のプロファイルを示す。

3. 数値モデル 乱流モデルは、乱流エネルギー k とエネルギー消散率 ε に基礎をおき、従来の $k-\varepsilon$ モデルを大気安定度を考慮し改良したものである。本研究では垂直方向の一次元移流セル型モデルを考える。形状抵抗を含む場合の運動方程式、乱流エネルギー k 及び、エネルギー消散率 ε の方程式は、それぞれ、

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \eta C_d A(x_3) U_i |U_i| - \varepsilon_{ijk} \Omega_j (U_k - U_{k,g}) \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{K_m}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P + G - \varepsilon + \frac{1}{2} \eta C_d A(x_3) [|U_1|^3 + |U_2|^3] \quad (2)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{3\varepsilon}{4k} \eta C_d A(x_3) [|U_1|^3 + |U_2|^3] \quad (3)$$

と書ける。ここで、 $\langle \rangle$ は平均値、 η は都市キャノピー要素の割合、 C_d は抗力係数、 ε_{ijk} は交代テンソル、 Ω_j は地球の自転ベクトル、 $U_{k,g}$ は k 方向の地衡風速、 $P = -\langle u_i u_j \rangle \partial U_i / \partial x_j$ 、 $G = g/T \langle u_3 \theta \rangle$ 、 A は建物表面積密度、乱流拡散係数は、 $K_m = C_m k^2 / \varepsilon$ で与えられ、 C_m は安定度と $f_w = (\ell/\kappa/z)^2$ の関数となる。 ε 方程式の係数は大気安定度と f_w の関数として合理的に与えることができる。一方、熱の保存式は

$$\frac{D\Theta}{Dt} = -\frac{\partial \langle u_i \theta \rangle}{\partial x_i} + \text{Rad} + Q_s \quad (4)$$

ここで、 Rad は大気放射による気層の加熱・冷却率、 Q_s は人工熱源強度。都市キャノピー層における建築物の表面積密度 A は単位体積中に占める主風向に直角な断面積で、 A の z 方向のプロファイルは建物表面積密度関数 $\hat{a}(z/H_c)$ を用い、 $A(z) = \xi A_t \hat{a}(z/H_c)$ とおける (A_t は全建物表面積密度、 H_c はキャノピー層の高さ、 ξ は主風向に垂直な壁面の割合)。ここで、

$$\hat{a}(z/H_c) = a_m \left(1 - \frac{z}{H_c}\right) \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{z}{H_c} \left(\frac{z}{H_c} - 2\lambda \right) \right] \quad (5)$$

である⁴⁾ (a_m は $\int \hat{a}(z/H_c) dz = 1$ となるような規格化定数、 λ は都市の建物の高度分布により異なる係数)。 $\hat{a}(z/H_c)$ の係数は、札幌市の中心部 1km^2 の建築物データ (昭和55年度都市計画基礎調査) から求めた。表1に数値計算条件を示す。この条件は札幌市の平均的オーダーを与えている。

4. 結果 図3に風速、温度、 $\langle u \rangle$ 、 $\langle w \rangle$ 、 $\langle w\theta \rangle$ 、 $\langle \theta^2 \rangle$ の郊外と都心部の垂直プロファイルを示す。図4には $\langle w\theta \rangle$ の $x-z$ 断面を示す。図5には乱流エネルギー収支の都心部でのプロファイルを示す。平均風速は都市域ではキャノピー要素の抵抗のため減少する。一方、郊外の安定層は都市域では崩壊し、高度約50mまで等温層を形成し、その上空に Cross-over 領域がみられる。二次の乱流統計量は郊外では典型的な安定層の特徴を示すが、都市域ではプロファイ

ルが大きく変化し、 $\langle w\theta \rangle$ はキャノピー層付近では一定値をとり、 $\langle w\theta \rangle$ は高度60mで負のピークをもち、顕熱を上空から下向きへ輸送している。これらの結果は図1、2とよく一致している。都市境界層上部の $\langle w\theta \rangle$ の負のピークは図4に示すように都市域から風下郊外へ向かっており、これは Urban Heat Plume に対応する。一方、乱流エネルギーが収支より、都市域では $P + (\text{キャノピー生成項} + \text{拡散項})$ が ε とバランスし、都市の人工熱の効果 (G) は極めて小さく、従来の研究で言われている人工熱の寄与は、都市境界層の形成メカニズムとしては小さいことが確認された。

参考文献 1) 文部省環境科学研究報告書 B-296 R15-1、1986、 2) Uno, I et al.(1986): Proc. 7th World Clean Air Congress. 3) Gibson and Launder(1978): J. Fluid Mech. 52, p.609. 4) Kondo and Akashi(1976): Boundary-Layer Met. 9, p.91. 5) Deardorff(1978): J. Geophys. Res. p. 1889. 6) Pileke(1983): Mesoscale Met. Modeling, Academic Press.

表1 数値計算の条件

乱流拡散係数	$k-\varepsilon$ 乱流クロージャモデル ³⁾
都市域の粗度	U_1, k, ε 方程式中の抵抗係数
地表面熱収支	Force-Restore 法 ³⁾
大気長波放射	H_2O, CO_2 を考慮した等温近似 ⁴⁾
時間差分	陰差分 (Lasson), $\Delta t=30\text{sec}$
計算高度	地表面から上空 3000 m まで 40層
最小空間分解能	$\Delta z=5\text{m}$ (上空 80m まで一定)
平均建物高	$H_c=40\text{m}, \eta=0.35, \xi=0.25, C_d=0.2$
建物表面積密度	$A_f=0.05 \text{ m}^{-1}, a_m=2.27, \lambda=0.161$
人工熱源強度	$Q_a=0.076 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$
地街風速	$U_g=10\text{m/s}, V_g=0\text{m/s}$

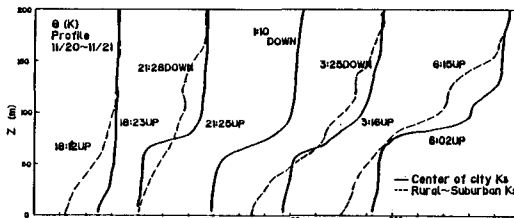


図1 郊外(点線)と都心部(実線)での温度プロファイルの変化

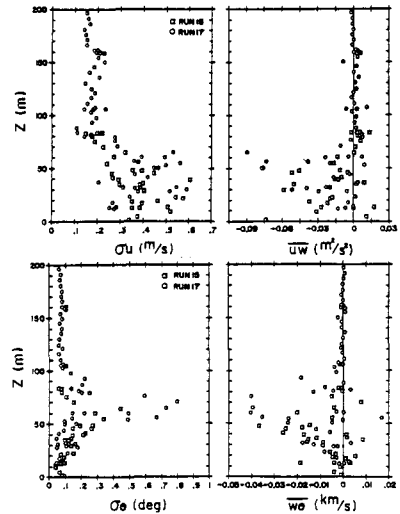


図2 都心部で乱流統計量の実測値

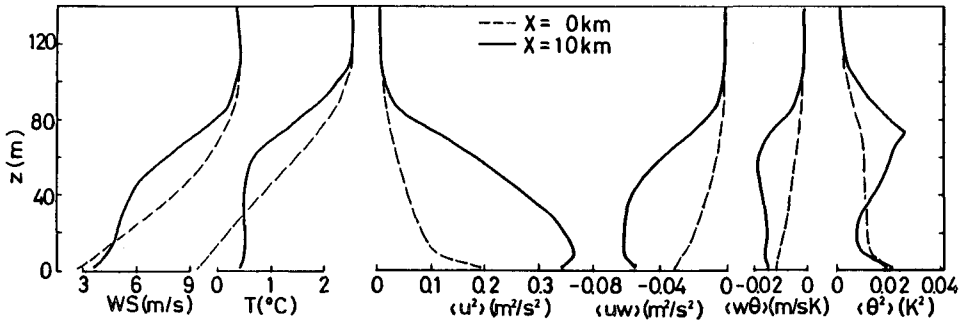


図3 都市境界層乱流モデルによる郊外(点線)と都心部(実線)でのプロファイルの比較(比較地点は図4のx軸に対応する)

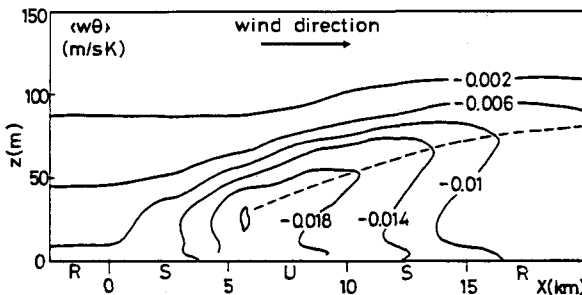
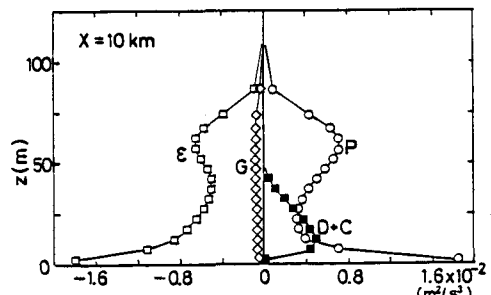


図4 $\langle w\theta \rangle$ の $x-z$ 断面図(図中のR、S、Uは順に 図5 郊外、市街地、都心部の条件を意味する)



都心部での乱流エネルギー収支 ($D+C$ は拡散項と都市キャノピー要素による k の生成を示す)