

(7) 夜間の都市境界層の観測とモデリング

Observation and its Modeling of the Nocturnal Urban Boundary Layer

鶴野伊津志^{*}、植田洋匡^{*}、若松伸司^{*}、大原利眞^{**}

Itsushi UNO^{*}, Hiromasa UEDA^{*}, Shinji WAKAMATSU^{*}, Toshimasa OHARA^{**}

ABSTRACT; High pollutant concentrations, exceeding the Japanese environmental standard, have been observed in large cities during the winter night-time. One reason for this is the occurrence of a special meteorological condition, the nocturnal urban boundary layer (UBL), over the cities. In this paper, the basic modeling method for urban area was proposed. In this model, the turbulent diffusion coefficient was modeled by the turbulent kinetic energy (k) and energy dissipation rate (ϵ). The most important improvement of this model is the special treatment of urban building density by using form drag concept. The calculation result for the idealized urban condition shows the typical UBL characteristics. For the validation of the model, an extensive field observation result of the UBL structure conducted during January 1983 in Shinjuku, Tokyo, was presented. In this observation, the meteorological parameters and pollutant concentrations were observed using specially designed kytoon-mounted turbulence sonde system. The observed characteristics of nocturnal UBL including the land breeze penetration shows the good agreement with the model results. The proposed model can be used for the planning of the urban area in order to decrease the high pollutant concentration.

KEY WORDS; Air Pollution, Turbulence, Urban Boundary Layer, Heat Island, Modeling

1. 緒言

都市域における大気汚染濃度は自動車の排ガス規制の強化、燃料規制や施設の改善に伴って平均的には横ばい乃至は低減しつつあるが、冬期の夜間などには特殊な都市気象条件下で窒素酸化物濃度等の著しい高濃度が出現することがあり大きな問題とされている。

人間活動により都市大気中に放出された物質や熱は、都市それ自身が作り出す気象条件のもとで都市大気中に拡散する。一般に、都市内部ではまわりの地域よりも建築物が多く、地表面の形状も異なっているために周辺地域とは異なった気象環境が形成され、その代表的なものとして都市境界層やヒート・アイランドなどが知られている (Oke 1978)。しかし、これらの現象の詳細な構造や、その形成機構については必ずしも十分に解明されていない。都市域における大気汚染機構を明らかにするためには、大気汚染の測定とあわせて、このような都市気象の動態の観測とモデル化を進める必要がある。

都市気象の典型的な特徴の一つは図1に模式的に書かれるような都市境界層の出現に端的に示される。すなわち、風上郊外で形成された安定成層が都市に内在する種々な要因により市街

^{*} 国立公害研究所大気環境部 National Institute for Environmental Studies

^{**} (財)計量計画研究所 Institute for Behavioral Science

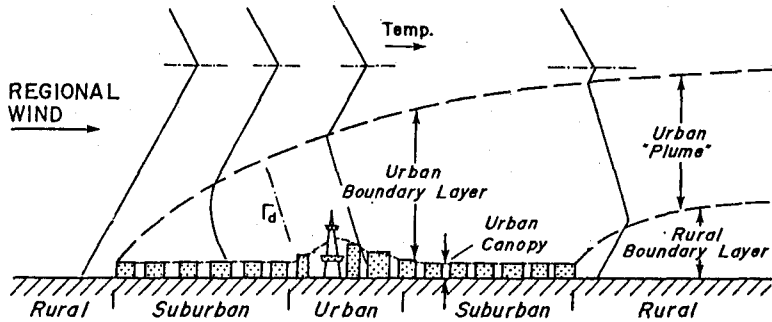


図1 都市境界層の概念図 (Γ_d は乾燥断熱減率)、Oke(1978)を修正。

地に入るにつれて順に崩壊し、図に示されるような都市境界層とヒートアイランドを形成するとともに、汚染質の垂直方向の拡散を妨げるというものであり、都市境界層は都市上空の鋭い温度逆転層（以下、上空逆転層）の存在によって特徴づけられる。

このような都市上空の気象特性は、Duckworth and Sundberg(1954)、Bornstein(1968)、Clarke(1969)、久保(1963)などにより示されている。それらによると、都心部では建物密度に比例して温度が郊外よりも高くなること、及び、都心部では建物高度の約3倍の高さまで等温または不安定成層が存在すること、都市上空の気温は郊外の同高度よりも低くなること（Cross-over）、都心部の高温気塊が郊外へ“urban heat plume”として移流している可能性があること、などが判明している。一方、鶴野(1986)は夜間の都市域の乱流拡散は主に都市の建物による機械的な乱流生成の効果が支配的であることを報告している。

本研究は、このような背景をふまえて、特に冬期の夜間の都市域における高濃度大気汚染と気象の関係を十分に精度良く再現可能な乱流モデルの構成を示すとともに、そのモデルから予想される汚染質の垂直プロファイルなどを示す。さらに、モデルの結果を、東京新宿御苑において実施したフィールド観測結果と比較することにより夜間の大都市の大気拡散機構について検討を加える。

2. 都市域における乱流拡散モデル

2.1 従来のモデルの問題点

都市域という水平方向に不均一な場をモデル化する場合には、平坦地で確立された大気拡散理論をそのまま適用することは出来ない。すなわち、都市域に林立する建築物の大気乱流に及ぼす効果をいかにモデル化するかが重要となる。孤立した建物の場合には、グリッドを細かくすることで数値計算によりモデル化することが可能であるが、実際の都市域のスケールにおいて同様なアプローチを取ることは不可能であり、なんらかの方法で建物の効果をモデル化する必要が生じる。

乱流拡散係数 K_m は、 $K_m = -\overline{uw} / (\partial U / \partial z)$ で定義されるが、レイノルズ応力 $\overline{uw}$ は通常の測定では得られないため、混合距離モデルを利用して、 $K_m = \ell_m^2 |\partial U / \partial z|$ が従来のモデルでは利用されてきた。ここで、 ℓ_m は混合距離で Blackadar(1963) のモデルが用いられ、

$$\ell_m = \frac{\kappa (z + z_0)}{1 + \kappa (z + z_0) / \ell_{\max}}, \quad \ell_{\max} = 0.00027 U_g / f c \quad (2-1)$$

と書かれる (κ はカルマン定数、 U_g は地衡風速、 f_c はコリオリ係数、 z_0 は粗度係数)。乱流拡散係数を混合距離モデルで表現すると、都市の粗度は z_0 のみでモデル化されることになる。都市域における z_0 の値は 1 ~ 5 m 程度の値が報告されている (Counihan, 1975) が、これに対応する建物分布の形態がどのようなものかは明らかにされていない。 z_0 の概念を都市域のモデル化に利用するとモデル計算の適用可能高度は、実際上は z_0 の 100 倍以上の高さからとなり、これは都市の平均建物高さの数倍以上の高度に相当する。夜間の都市境界層の高さは平均建物高さの数倍であり、 z_0 による乱流輸送理論では現象の本質を再現することができない。また、このような粗度係数にもとづく拡散モデルと平均建物高さ以下に重要となる都市の熱的要素のモデルを組み合わせた従来の研究は不適切なものと考えられる。

本研究では、建物の大気乱流に及ぼす効果を形状抵抗係数の概念を用いて定式化する。ここで、形状抵抗係数は単位体積当りの風向に垂直な断面積を用いて定義され、本研究では建物表面積密度 $A(z)$ として表す。都市の建築物は平均風速を減少させ、平均流の持つエネルギーを機械的な乱流エネルギーへと変換させる効果を持つ。それゆえ、建物による乱流エネルギーの生成を含む k 方程式の定式化が有力なモデルと考えられる。乱流エネルギー k とエネルギー消散率 ε に基づく 2 次の乱流クロージャーモデルによれば、 K_m は、 $K_m = C_m k^2 / \varepsilon$ で定義される。ここで、 C_m は定数もしくは大気安定度に依存する変数が用いられる (例えば、Rodi 1980)。従って、 $A(z)$ を運動方程式と k 、 ε 方程式に同時に含めることで建物の効果を適切に表現する都市スケールの大気乱流モデルを構築することが可能となる。

2. 2 基礎方程式

建物表面積密度 $A(z)$ を含む場合の基礎方程式は、

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_m \frac{\partial U}{\partial z} \right] + f_c (V - V_g) - \frac{1}{2} \eta C_d A(z) U |U| \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_m \frac{\partial V}{\partial z} \right] - f_c (U - U_g) - \frac{1}{2} \eta C_d A(z) V |V| \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_h \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{rad} + Q_M(z) \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + P + G - \varepsilon + \frac{1}{2} \eta C_d A(z) [|U|^3 + |V|^3] \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{3\varepsilon}{4k} \eta C_d A(z) [|U|^3 + |V|^3] \quad (2-6)$$

と書かれる。上式で下線の項が建物の効果に相当する。なお、 U 、 V は風速、 Θ は温位、 $A(z)$ は建物表面積密度 (m^{-1})、 η は建物の占める割合、 $C_d (=0.2)$ は抗力係数、 $(\partial T / \partial t)_{rad}$ は大気放射による温度変化項、 $Q_M(z)$ は人工排熱による温度変化項、 $P = -\overline{u_i u_j} \partial U_i / \partial x_j$ 、 $G = -g_i / T \overline{u_i \theta}$ 、 U_g, V_g は地衡風速。 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ であり、 ε 方程式の係数は安定成層の場合、 $C_{1\varepsilon} = 1.44(1+0.8R_f)$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ で与えられる (Rodi, 1980)。なお、 $k - \varepsilon$ に基づくより精密な乱流クロージャーモデルは、例えば、Rodi (1980)、鶴野ら (1987) に示されている。

2. 3 建物表面積密度 $A(z)$

以上の式において最も重要な $A(z)$ の実際の都市域での情報は十分に確立されていない。 $A(z)$ は単位体積中に占める主風向に直角な断面積で定義される。 $A(z)$ はこの定義により個々の都市域の区画に対して異なった形状を取るが、本研究では、実測値との比較結果より、都市キ

ヤノピー層高度を H_c とした場合、

$$A(z) = \xi A_t \hat{a}(z/H_c) \quad (2-7)$$

を考える。 $\hat{a}(z/H_c)$ は建物表面積密度関数で、

$$\hat{a}(z/H_c) = a_m(1 - \frac{z}{H_c}) \exp[-\frac{1}{2} \frac{z}{H_c} (\frac{z}{H_c} - 2\lambda)] \quad (2-8)$$

で与えられる。ここで、 a_m は規格化定数($\int \hat{a}(z/H_c) d(z/H_c) = 1$)、 λ は都市の建物の高度分布などにより異なる値を持つ、 A_t は全建物表面積密度、 ξ は主風向に垂直な壁面積の割合。なお、 $\hat{a}(z/H_c)$ はKondo and Akashi(1976)による密度関数である。図2に札幌市の中心部でのモデルと実測の比較を示す。図中の○印は、昭和55年度『都市計画基礎調査』より札幌市中心部の約1 Km²の範囲の建物データに対する結果であり、この場合、 $A_t = 0.05m^{-1}$ 、 $a_m = 2.27$ 、 $\lambda = -0.161$ が良い近似式となっている。

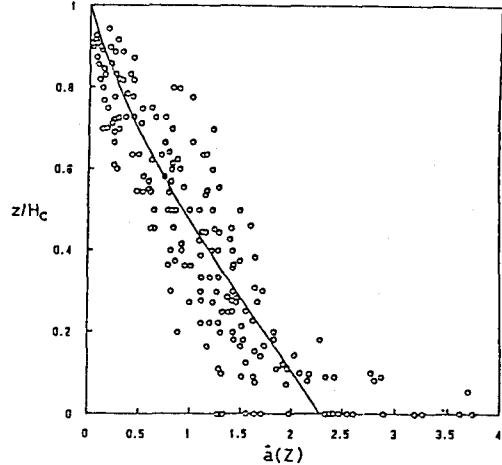


図2 札幌市の中心部 1Km²の建物データより計算された建物表面積密度分布(○印)と最適回帰曲線。

2. 4 人工排熱のモデル化

従来のモデルでは、都市活動による人工排熱はすべて地表面を加熱するとして扱われている。しかし、人工排熱は主に暖冷房に用いられるためその垂直分布は建物の垂直分布と密接に関連すると考えることが出来る。人工排熱による気温の上昇率 $Q_M(z)$ は $\hat{a}(z/H_c)$ を利用することで建物分布に相似の空間分布を次式により与える、

$$Q_M(z) = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_m}{\rho C_p} \frac{1}{H_c} \hat{a}(\frac{z}{H_c}) \frac{\Delta z}{H_c} \quad (2-9)$$

ここで、 Q_m は全人工熱排出量を示す。

2. 5 モデルの結果と可能性

本研究で提案したモデルは、式(2-2)～(2-9)、および、地表面における熱収支式、大気放射の式を組み合わせることにより実際の都市域に適用可能となる。本モデルの最大の特徴は、従来の都市域のモデルと異なり、都市域の地表面から適用可能な点にある。また、建物を建物表面積密度として表現し、建物による乱流生成を的確に表現している点が最大の特徴である。

図3には、本モデルによる理想化された都市域における計算結果を示す。この図より、夜間の都心部での、従来観測されている上空逆転層に代表される温位分布が良く再現され、汚染質は都市境界層高度以下に閉じ込められることがわかる。以上の結果は、都市域における気象・大気汚染に関する総合的な評価を行う際には、その第一歩として都市域の乱流特性、特に、建物の大気拡散に及ぼす効果を十分に加味したモデルを構築する重要性を示している。

本モデルを三次元場を用いると、建物の空間分布や水平分布を変更した場合の都市域の乱流拡散特性をシミュレートすることが可能となり、都市域の高濃度大気汚染を制御するための、排出量の削減計画・交通量の規制などの環境施策の理論的根拠となる。また、高濃度大気汚染を未然に防止することを目的する都市計画や交通計画策定の際の基礎としても利用可能である。

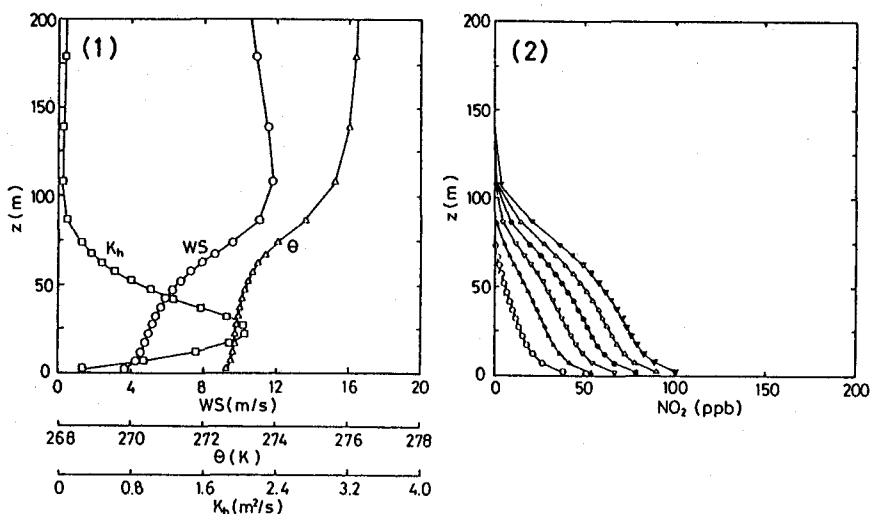


図3 理想化された条件下での乱流拡散係数 K_h 、風速 WS 、温位 Θ 、および、汚染質濃度の垂直プロファイル。但し、(2)は(1)の条件で地上から排出された NO_2 の10分毎の濃度変化を示す。計算条件は鶴野ら(1987)に準じた。

3. 都市境界層のフィールド観測

一次汚染質(窒素酸化物など)による高濃度の大气汚染が頻繁に出現する冬期の夜間を対象として、東京の新宿御苑において乱流と大气汚染の垂直分布の観測を行った(大原ら、1986、1987)。観測は1983年1月の25~26日、27~28日のそれぞれの夕方から翌朝にかけて実施した。本観測では、特別に開発された小型の超音波風向風速計(以下、乱流ゾンデ; Ogawa and Ohara 1982)を係留気球(70m³)に搭載し都市上空の乱流変動を直接測定を実施した。また、汚染濃度の垂直分布は係留気球の係留索にテフロンパイプを取り付け空気を吸引し地上で測定し、 O_x はテザー・ゾンデにセンサーを取り付けて上空で測定した。表1に観測項目を示す。以下では、比較的気象条件の良かった27~28日についての結果を示す。

図4にはドップラー・ソーダで測定された風速ベクトル(10分間平均値)の時空間変化を示す(図中のA~Hは乱流ゾンデの上昇・下降を示す)。本観測の実施された27日は、20~21時頃まで南西の風向が卓越しており、その後、風向は北西~北に急変している。これは風系が海風から陸風に変化したことを端的に示す結果である。図5に図4のA、Hの乱流ゾンデの観測結果より風向、風速、温位、 NO_x の垂直プロファイルの時間変化を示す(Aは海風時、Hは陸風時に相当する)。図6には窒素酸化物 NO_x の垂直プロファイルの時間変化を示す。図7には温位プロファイルの変化を示す。

表1 新宿御苑におけるフィールド観測の測定項目

	測定高度	気象要素測定項目	汚染濃度
乱流ゾンデ	0-250m	3次元風速、温度変動、湿度	NO , NO_x , SO_2
テザー・ゾンデ	0-600m	風向、風速、温度、湿度	O_x
ドップラー・ソーダ	100-500m	3次元風速(平均値、標準偏差)	

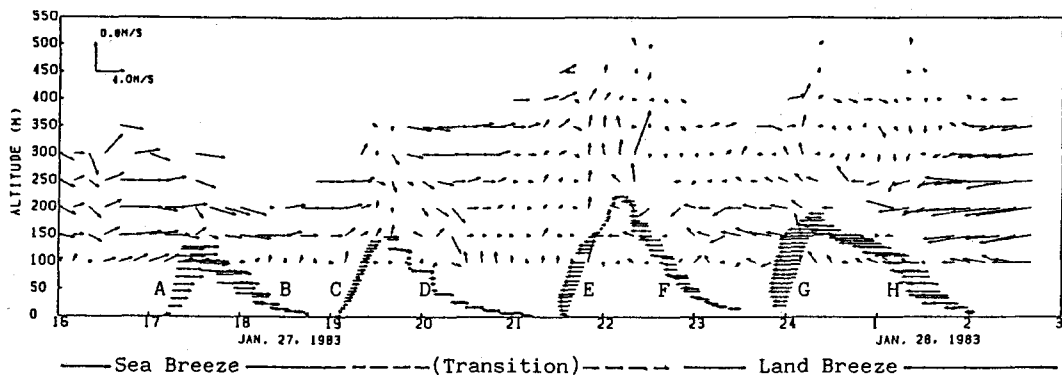


図4 ドブラー・ソーダで測定された風速ベクトルの時空間変化[風速の南北成分と垂直成分; 大原ら(1986)を修正]。図中のA~Hは乱流ゾンデの上昇・下降のRUN番号を示す(乱流ゾンデは水平方向成分のみを示した)。

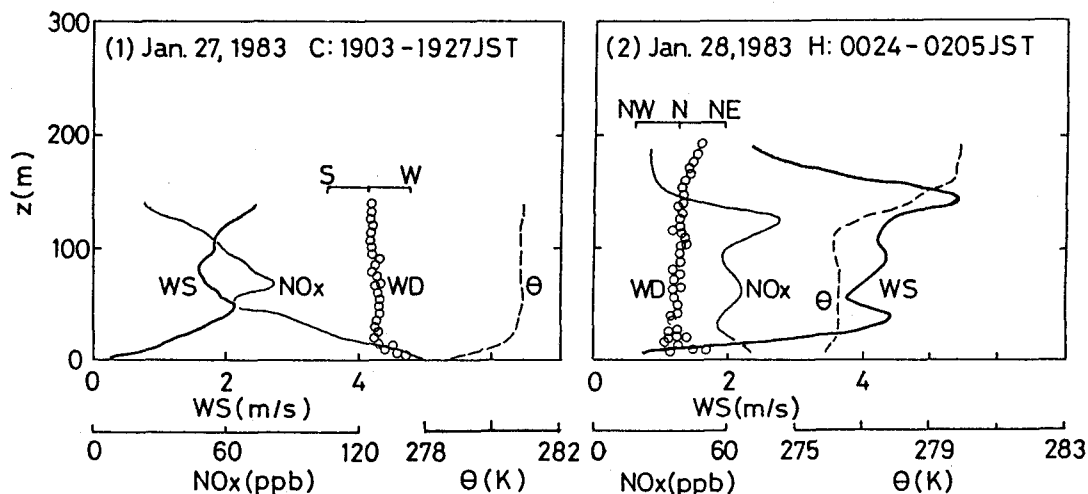


図5 乱流ゾンデで測定された風速、風向、温位、 NO_x の垂直プロファイル。
(1) 図4のC、(2) 同H(都市境界層出現時)

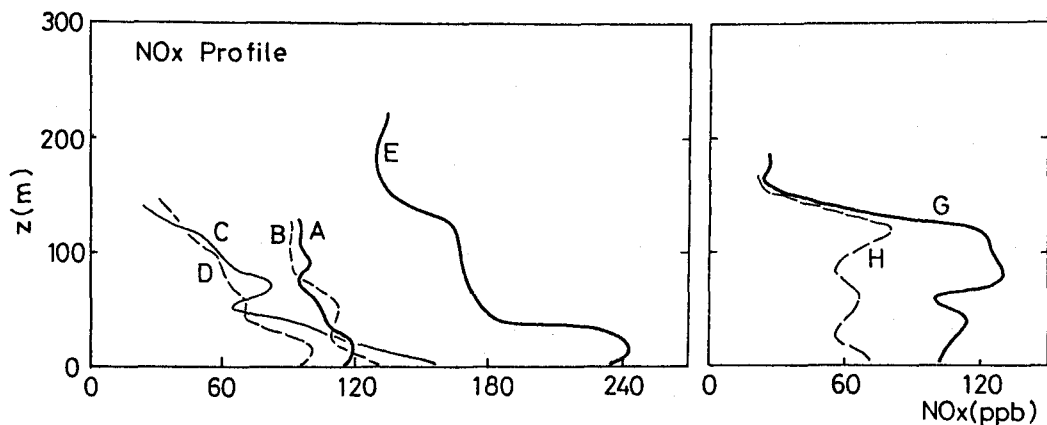


図6 NO_x の垂直プロファイルの時間変化。図中のA~Hは図4のRUN番号に相当し、E以降は陸風前線通過後に対応する。

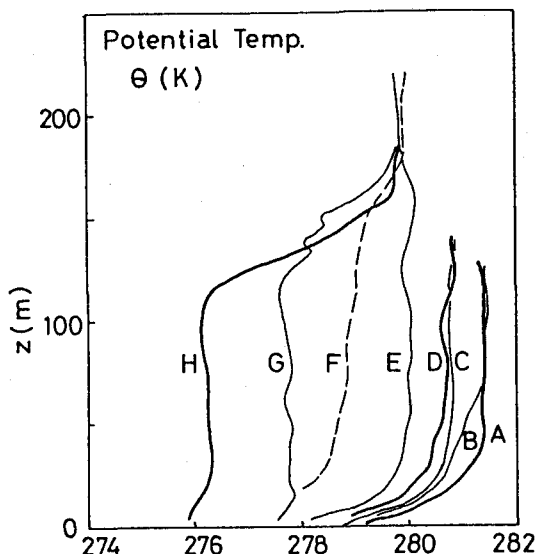


図7 乱流ゾンデで測定された温位プロファイルの時間変化。G、Hは典型的な都市境界層の出現を示している。

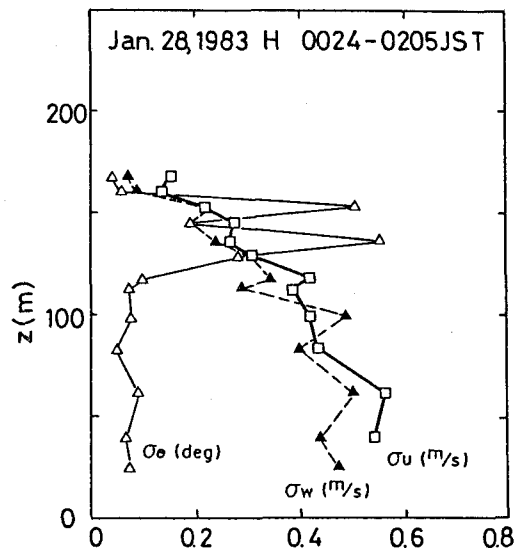


図8 乱流ゾンデで測定された風速、温度変動の標準偏差。図4のHに対応し都市境界層出現時に相当する。

陸風前線の通過後の午前0時頃からの温位分布は、典型的な都市境界層の出現を示している。夜間の都市境界層は都市上空の鋭い温度逆転層により特徴付けられており、午前3時過ぎまで継続的に観測された。都市境界層高度は約120～150 m程度であり、東京都心部の平均建物高度の数倍程度と考えられ、これは都市域の水平スケールに比較して極めて薄いものである。

一方、 NO_x のプロファイルには図6に示すように陸風前線の通過後に高濃度が出現し、都市境界層高度以下で汚染質が閉じ込められ、濃度分布が均一化されている。これは、都市境界層内部では、建物等により生成された機械的な乱流拡散が支配的であるためと考えられる。

図8には、乱流ゾンデで観測された2次の乱流統計量の垂直分布を示す。平坦地の通常の安定成層においては、これらの2次の乱流統計量は高度とともに単調に減少するが、都市域では夜間においても上空逆転層高度以下ではほぼ一様に近い分布を示し、都市境界層内では乱流変動が大きいことを示している。一方、温度変動は上空逆転層付近にのみ変動が大きく、都市境界層内部では温度の変動が小さいことを示している。以上の観測結果は図3に示したモデルの結果と定性的に合致している。図9には、本観測で示された結果より、都市境界層の垂直構造の模式図を示す。都市境界層は陸風層内の内部境界層として出現している。また、これらの特徴は本質的には、札幌市における測定結果より鶴野(1986)に示された結果と同等なものと考えられる。

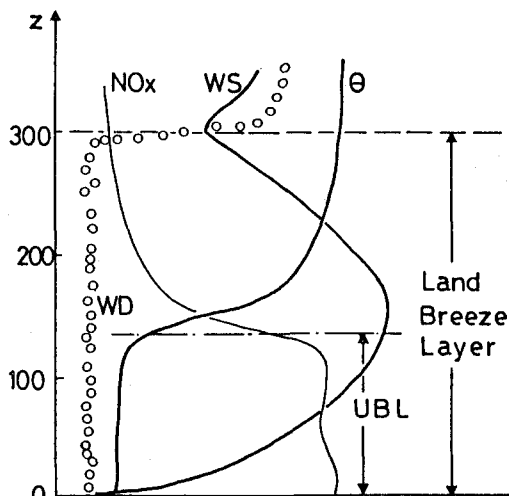


図9 乱流ゾンデとテザー・ゾンデの測定結果による陸風時に発達する都市境界層の垂直断面の模式図。

4. 結言

本報では、都市域に適用可能な乱流モデルについての基礎的な考え方を示した。本モデルは、建築物による乱流の生成および建築物の空間的な占有率を的確に表現し（建物表面積密度）、さらに、建物高のオーダーの気層における乱流輸送機構におよぼす密度成層効果（大気安定度）を表現できる乱流輸送理論を基礎としている。特に、実際の都市域における建物表面積密度 $A(z)$ は、本研究で始めて提案されたものである。また、理想化した都市域で予想される気象要素の垂直プロファイルと汚染質濃度についてもシミュレーション結果を示した。

さらに、夜間の都市域における気象特性と大気汚染濃度の垂直プロファイルの変化を東京新宿御苑における野外観測結果をもとに示した。高濃度の汚染は大気汚染は海風から陸風への交代期に出現する。また、陸風層の厚さは約 300 m であり、地上から約 150 m までは都市境界層を形成し、上空には鋭い温度逆転層が存在し、都市境界層高度以下では汚染質は閉じ込められ、濃度分布はほぼ一定となる。観測された都市域での特徴は、本研究で提案されたモデルによる計算結果を支持するものである。

参考文献

- Blackadar, A.K. (1963): The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 67, 3095-3102.
- Bornstein, R.D. (1968): Observations of urban heat island in New York City, *J. Appl. Meteorol.*, 7, 575-581.
- Clarke, J.F. (1969): Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 582-589.
- Counihan, J. (1975): Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmos. Environ.*, 9, 871-905.
- Kondo, J. and Akashi, S. (1976): Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers. *Boundary-Layer Meteorol.*, 10, 255-272.
- 久保時夫 (1963): 下層大気中の逆転層と汚染について、気象研究ノート、14, 293-304.
- Ogawa, Y. and Ohara, T. (1982): Observation of the turbulent structure in the planetary boundary layer with a kite-mounted ultrasonic anemometer system. *Boundary-Layer Meteorol.*, 22, 123-131.
- 大原利眞、鶴野伊津志、若松伸司 (1986): 東京都心部における冬期夜間の乱流と汚染濃度の鉛直分布、第 27 回大気汚染学会講演要旨集、No. 739.
- 大原利眞、鶴野伊津志、若松伸司 (1987): 陸風前線通過に伴う NO_x 高濃度汚染現象の解析、第 28 回大気汚染学会講演要旨集 (発表予定)
- Oke, T.R. (1978): *Boundary Layer Climates*, Methuen & Co. Ltd.
- Rodi, W. (1980): *Turbulence models and their application in hydraulics - A state of art review* -, International Association for Hydraulic Research.
- 鶴野伊津志 (1986): 都市域の気象特性、文部省『環境科学』研究報告書 B-296, R15-1, 27-64.
- 鶴野伊津志、植田洋匡、若松伸司 (1987): 都市キャノピー層を考慮した都市境界層乱流モデル、土木学会第 42 回年次学術講演会