

地表面温度差の物質拡散に及ぼす影響について

—都市温熱環境の風洞実験によるシミュレーション—

Wind Tunnel Experiment about Gaseous Diffusion on Flat Plate
with Surface Temperature Difference

— Simulation of Thermal Environment in Built-up Area by Wind Tunnel Experiment —

村上 周三*・大場 正昭*

Shuzo MURAKAMI and Masaaki OHBA

1. はじめに

都市の表面は建物・道路・公園緑地・池水等により覆われているが、建物・道路と公園緑地・池水間の表面温度差は、真夏時には20~30℃にも達しており^{1),2)}、この温度差が原因となって局所的に複雑な微気象が形成され、市街地における拡散現象にも大きな影響を及ぼしていると考えられる。本研究では、都市地表面の温度差を高温パネルと低温パネルでモデル化し、地表面温度差が物質拡散に及ぼす影響について風洞実験により検討した。

2. 風洞実験のための相似則

2.1 模型の幾何的相似： $l_m/l_p = \text{一定}$ (1)

2.2 Approach flowの相似

接地境界層の Approach flowを風洞実験で再現するための相似条件として、一般的に次のものが用いられる^{3),4)}。

・乱流レイノルズ数： $Re_t = \bar{U}l/K_M$ (2)

・バルクリチャードソン数： $Ri_b = (\Delta\bar{T}/\bar{T}_A)lg/\bar{U}^2$ (3)

2.3 床面の境界条件の相似

地表面に温度差のある場合の境界条件の相似式として鉛直方向の熱流束の相似を考え、Monin - Obukhov Length⁵⁾

$$L = -u_*^3 / [k(g/\bar{T}_A) \cdot (H/\rho C_p)]$$
 (4)

をある高さZで無次元した

$$(Z/L)_m = (Z/L)_p$$
 (5)

すなわち

$$H_p/H_m = (Z_m/Z_p) \cdot (\bar{T}_{A_p}/\bar{T}_{A_m}) \cdot (u_{*p}/u_{*m})^3$$
 (6)

を用いる。本報では、これを二、三の仮定の下に、次のように実験条件として設定可能な形に変形した⁶⁾。

$$(\alpha \cdot \Delta Ts)_p / (\alpha \cdot \Delta Ts)_m = (Z_m/Z_p) \cdot (\bar{U}_p/\bar{U}_m)^3$$
 (7)

これらの相似条件のうち、(1)~(3)式については実験条件の設定から考えて本報では一応満足されているものとみなし⁶⁾、(7)式を満たすことを条件として実験を行った。

3. 実験概要

3.1 実験装置

(1)風洞：使用した風洞は境界層型で測定部長さ4m、断面0.8×0.8mである。測定部の風上側には速度成層形成装置と温度成層形成装置が設置してある。また、測定部床面には都市の地表面の高温部と低温部をモデル化するために、Fig. 1に示すような Hot panel (高温部)と Cold panel (低温部)が組み合わされて配置されている。Type 1は Hot panelのみ、Type 2 (Hot panel + Cold panel)、Type 3は (Hot panel + Cold panel + Hot panel)である。

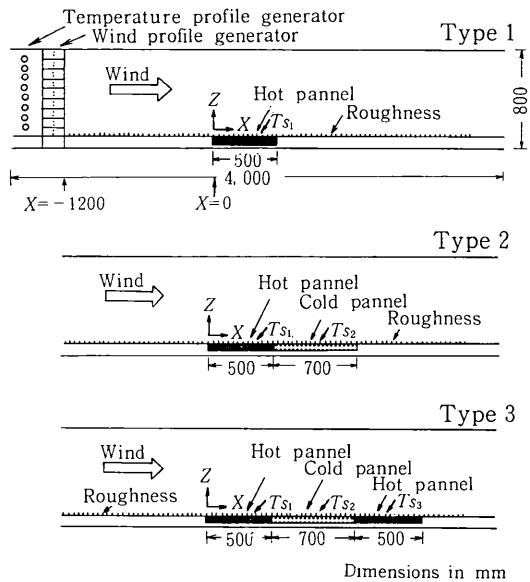


Fig.1 温度成層風洞の概要と床面温度分布のタイプ

(2)模型：街区を二次元のフェンスでモデル化する。使用したフェンスの形状は高さ40mm、厚さ8mm。配置形状はフェンスを設置しない場合、フェンスが1枚の場合(単体フェンス)、そして連続的に設置した場合(連続フェンス)の3種類である。フェンスの設置位置については、単体フェンスはX=-110mmまたは830mmに、連続フェンスはX=-110から160mm間隔で14個並べた。

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

3.2 実験条件

(1) 実物の境界条件の設定：気象庁高さの風速を $(\bar{U}_{Met})_p = 5.0 \text{ m/s}$ ，地表面と Approach flow との温度差を $(\Delta T_{S1})_p = 0, 24, 43^\circ\text{C}$ ， $(\Delta T_{S2})_p = 0, -8^\circ\text{C}$ ， $(\Delta T_{S3})_p = 0, 24, 43^\circ\text{C}$ ，対流熱伝達率を $\alpha_p = 30 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ と想定する。

(2) 風洞内の境界条件の設定：風速を $(\bar{U}_{Met})_m = 0.85 \text{ m/s}$ ，対流熱伝達率を Hot panel や Cold panel を含めた平均値として $\alpha_m = 14 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}^6$ ，形状比を $1/250$ とすれば，風洞床面の表面温度は (7) 式から $(\Delta T_s)_p$ に対応して Table 1 に示すように求められる。

なお，Approach flow の風速と温度は，床面上に模型を設置しない状態で $X = -110 \text{ mm}$ ， $Z = 200 \text{ mm}$ （気象庁高さに相当）を基準点を選んで設定した。

(3) トレーサーガスの排出条件：フェンスと同じ高さの煙突（高さ40mm，内径4mm）を $X = -110, 525$ ，または 830 の位置に立て，トレーサーガス（純エチレンガス）を煙突高さでの平均風速 \bar{U}_s と一致させて排出した。

3.3 測定方法

(1) 風速測定：温度補償された I 型プローブを回転して \bar{U} ， $\sqrt{\bar{u}^2}$ ， $\sqrt{\bar{w}^2}$ ， $-\bar{uw}$ を測定した。⁷⁾

(2) 温度測定：輻射の影響を防ぐために，銀紙製の輻

射カバーを $\text{Cu}-\text{Co}$ 熱電対に取り付けて測定を行った。

(3) 濃度測定：水素炎ガスクロマトグラフィにより測定を行った。

4. 実験結果

4.1 拡散に対する床面温度分布の影響

(1) 床面温度分布 Type 1 の場合：風上の Hot panel のみ加熱して，その影響について調べた。結果を Fig. 2 に示す。 ΔT_{S1} が大きくなるほど Hot panel からの上昇気流も強くなり，トレーサーガスの拡散はその影響を受ける。従って， ΔT_{S1} の増加と共に C/C_0 の床面近傍の最大値は減少し，逆に上空の値が増大する。

(2) 床面温度分布 Type 1, 2, 3 の比較：Cold panel と Hot panel の影響について調べた。結果を Fig. 3 に示す。 Hot panel の隣りに Cold panel が設置されると Cold panel 上空から後流にかけて大きな冷塊域が形成される。冷塊域の境界線を仮に $\partial(\Delta T)/\partial Z = 0$ の点を結んだ線と定義すれば，実験 No. 4 の場合の冷塊域は Fig. 3 の斜線の部分である。トレーサーガスは冷塊域に妨げられて上空へ押し上げられるため，No. 4 と No. 5 では C/C_0 の最大値を生じる位置が上昇する。温度分布については Fig. 8 の $\Delta T(Z)$ を参照されたい。気流性状につ

Table 1 実験種類

| Exp. No. | Prototype | | | | Model | | | | Type of floor surface temperature | Arrangement of fences |
|----------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | \bar{U}_{Met} [m/s] | ΔT_{S1} [°C] | ΔT_{S2} [°C] | ΔT_{S3} [°C] | \bar{U}_{Met} [m/s] | ΔT_{S1} [°C] | ΔT_{S2} [°C] | ΔT_{S3} [°C] | | |
| 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0.85 | 0 | 0 | 0 | Type 1 | Without fence |
| 2 | 5 | 24 | 0 | 0 | 0.85 | 63 | 0 | 0 | | |
| 3 | 5 | 43 | 0 | 0 | 0.85 | 112 | 0 | 0 | | |
| 4 | 5 | 43 | -8 | 0 | 0.85 | 112 | -21 | 0 | Type 2 | Single fence |
| 5 | 5 | 43 | -8 | 43 | 0.85 | 112 | -21 | 112 | Type 3 | |
| 6 | 5 | 43 | 0 | 0 | 0.85 | 112 | 0 | 0 | Type 1 | |
| 7 | 5 | 43 | -8 | 0 | 0.85 | 112 | -21 | 0 | Type 2 | Row of fences |
| 8 | 5 | 43 | -8 | 43 | 0.85 | 112 | -21 | 112 | Type 3 | |
| 9 | 5 | 43 | 0 | 0 | 0.85 | 112 | 0 | 0 | Type 1 | |
| 10 | 5 | 43 | -8 | 0 | 0.85 | 112 | -21 | 0 | Type 2 | Row of fences |
| 11 | 5 | 43 | -8 | 43 | 0.85 | 112 | -21 | 112 | Type 3 | |

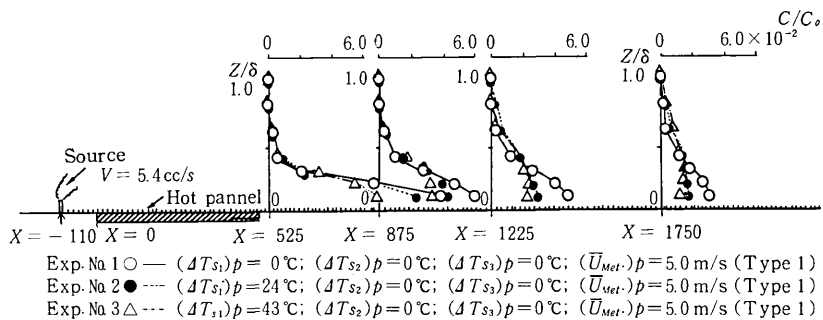


Fig. 2 拡散に対する床面温度分布の影響 (Type 1)

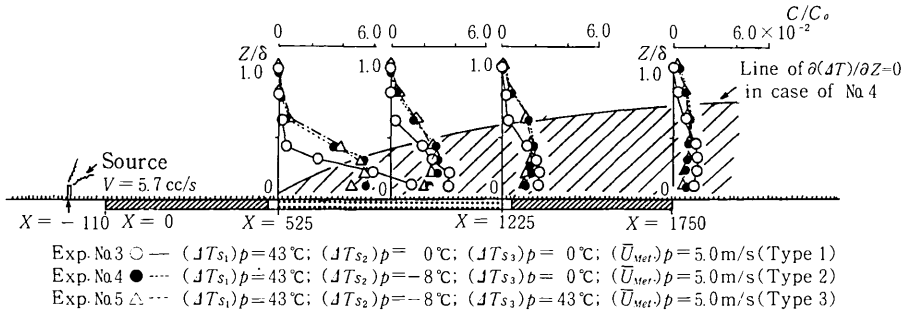


Fig. 3 拡散に対する床面温度分布の影響 (Type 1, 2, 3 の比較)

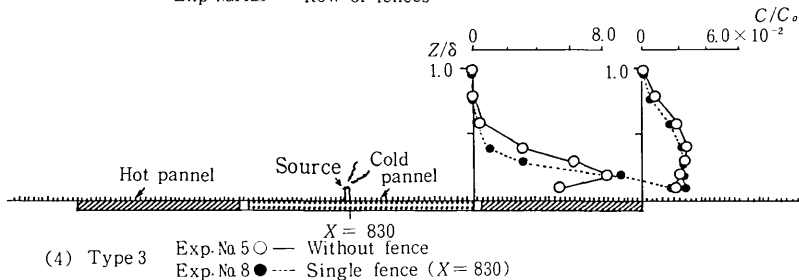
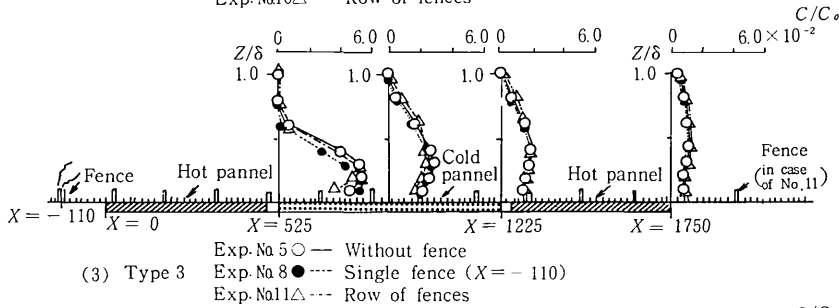
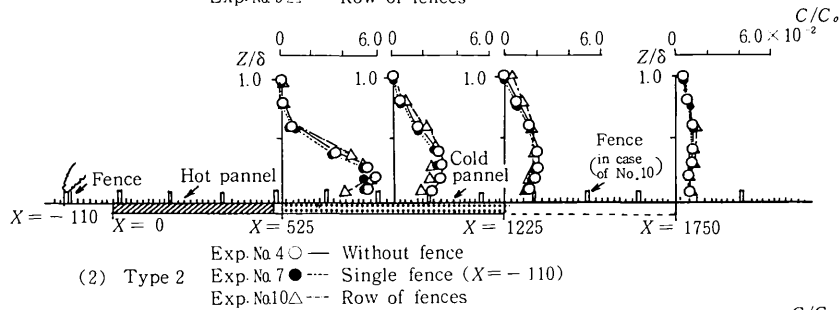
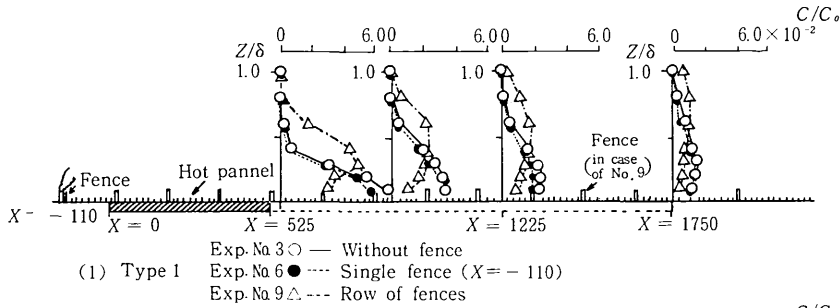


Fig. 4 拡散に対する模型形状の影響

いては 4.5 で詳しく述べる。

4.2 拡散に対する模型形状の影響

床面温度分布のタイプ別に拡散に対する模型形状の影響について調べた。結果を Fig. 4 に示す。

(1) 床面温度分布 Type 1 の場合： Fig. 4 (1) に示すようにフェンスなし (No. 3) と比べて連続フェンス (No. 9) では、フェンス近傍の値は減少し、逆に上空の値が増加する。これはフェンス列の設置によりフェンス後流の風速が低下し、Hot panel 近傍の乱流の程度も増加されて Hot panel からの上昇気流が増大するためである。

(2) 床面温度分布 Type 2 の場合： Fig. 4 (2) に示すように Hot panel の隣りに Cold panel が設置されるとフェンスなし (No. 4) 及び単体フェンス (No. 7) の場合は、冷塊の影響で最大値が上空に移動する。このため、連

続フェンス (No. 10) の場合と似たパターンになり、模型形状による濃度分布の差が明瞭でない。

(3) 床面温度分布 Type 3 の場合： Fig. 4 (3) に示すように Cold panel の隣りに Hot panel が設置されても、Cold panel 後流の $X=1225$ や $X=1750$ ではトレーサーガスがすでに十分拡散しているために、模型形状の差は明瞭でない。また、煙突を $X=830$ に移動した場合 (Fig. 4 (4))、煙突は冷塊域の中にあるので、煙突のみの No. 5 では Fig. 3 の No. 5 と同様に、最大濃度が床面で発生しない。しかし、単体フェンスの No. 8 ではフェンスによる乱れの影響で最大濃度が床面で発生する。

4.3 拡散に対する煙突位置の影響

床面温度分布 Type 3 において煙突だけ床板上にたて煙突位置を $X=-110, 525, 830$ と変化させ、拡散に対する煙突位置の影響について調べた。結果を Fig. 5 に示

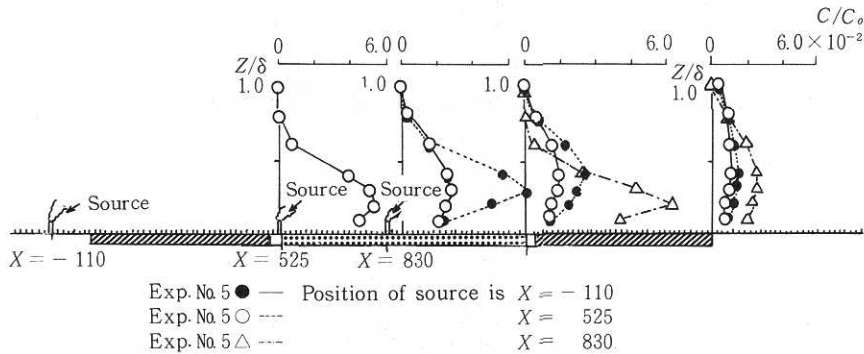


Fig. 5 拡散に対する煙突位置の影響

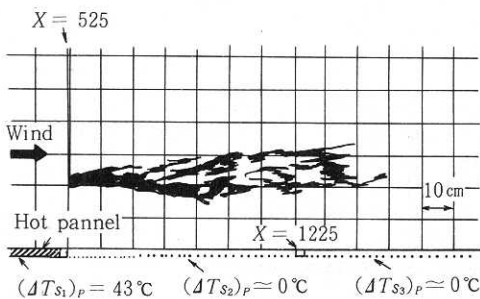


Fig. 6 可視化写真のスケッチ
(床面温度分布 Type 1, Exp. No. 3)

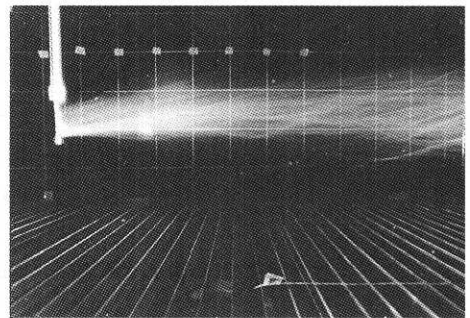


Photo 1.

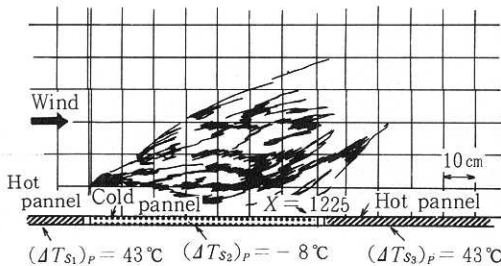


Fig. 7 可視化写真のスケッチ
(床面温度分布 Type 3, Exp. No. 5)

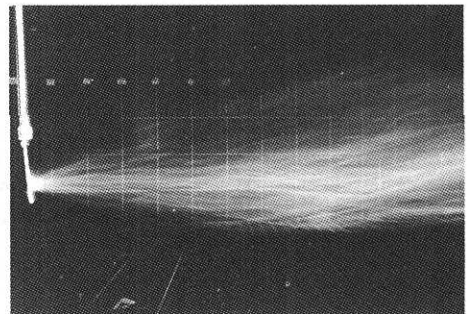


Photo 2.

す。煙突位置によらず拡散の状況は同じ傾向を示す。特に $X = 830$ のように煙突が Cold panel の真中であっても最大濃度が床面で発生しないことは、Fig.2 と比較した場合、注目すべきことである。

4.4 流れパターン

Hot panel と Cold panel の境 ($X = 525$) に線香を設置し、Cold panel により生じた冷塊が流れパターンに及ぼす影響について可視化により調べた。Fig.6 と Photo 1 は風上の Hot panel のみ (No.3) の場合である。煙は僅かに上昇しながら水平に流れる。煙の幅も広くない。Fig.7 と Photo 2 は (Hot panel + Cold panel + Hot panel) の No.5 である。煙は Cold panel 上で

きた冷塊により、一部は冷塊に巻き込まれて下降気流となり、一部は冷塊によって上へ押し上げられる。また、いったん下降した煙も風下の Hot panel より生じた上昇気流によって上空へ運ばれる。拡散の幅は No.3 と比べてはるかに大きい。

4.5 気流性状に対する床面温度分布の影響

床面温度分布のタイプ別に気流性状を調べた。結果を Fig.8 に示す。

- (1) \bar{U}/\bar{U}_∞ : Hot panel の隣りに Cold panel が設置されると、Cold panel 後流 ($X = 1225, 1750$ 付近) の風速分布は中央で窪んだ形になる (No.4, No.5)。
- (2) $\Delta T(Z)$: No.4 の冷塊域を Fig.3 と同様に斜線

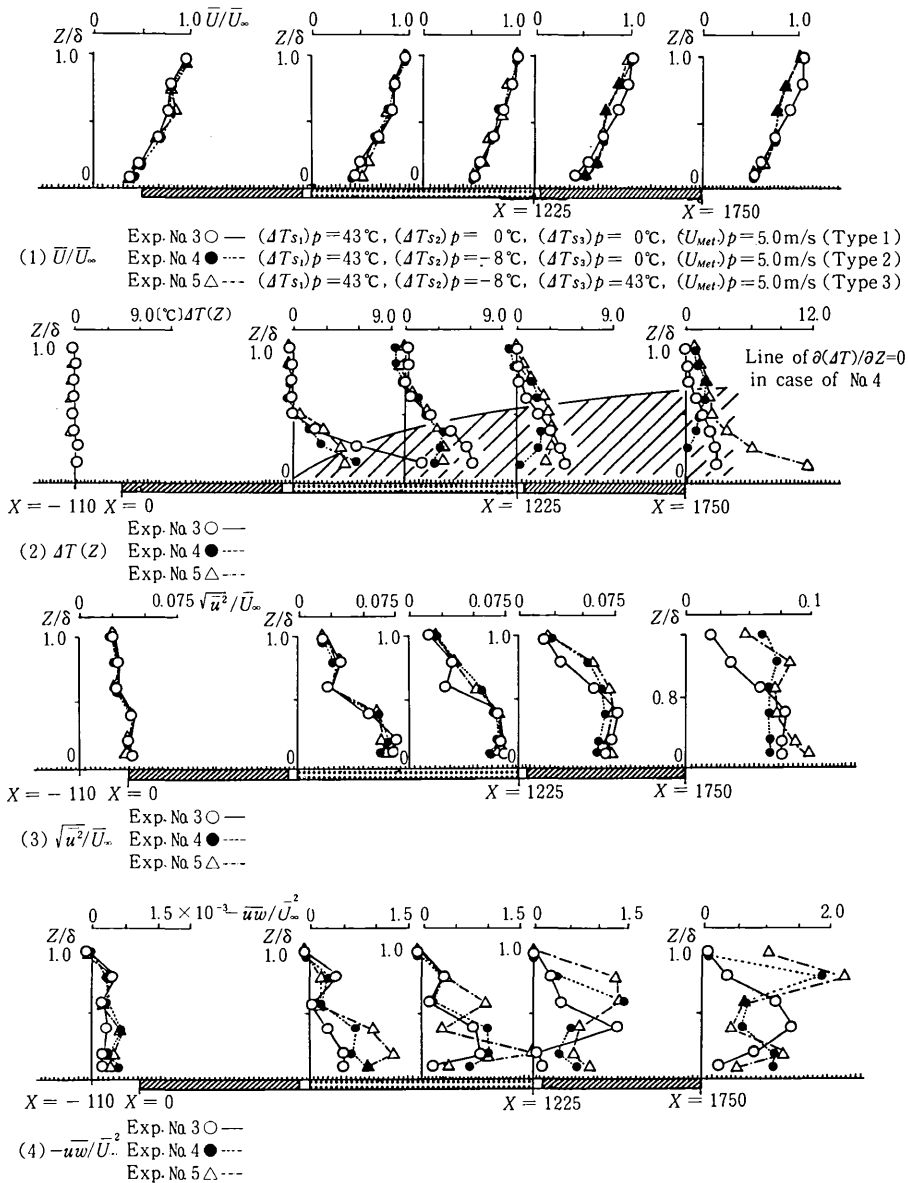


Fig. 8 気流性状に対する床面温度分布の影響 (Type 1, 2, 3 の比較)

で示す。また、No 5 の $X = 1750$ においては $Z/\delta \approx 0.5$ までは風下の Hot panel の、それ以上の高さでは風上の Hot panel と Cold panel の影響を受ける。

(3) $\sqrt{\overline{u}^2}/\overline{U}_\infty$: 風上の Hot panel より生じた上昇気流は冷塊に妨げられて上空へ移動するので、No 4 と No 5 の Cold panel 後流 $X = 1750$ の位置では、床面近傍の値と同様に上空の値が大きい。

(4) $-\overline{uw}/\overline{U}_\infty^2$: $\sqrt{\overline{u}^2}/\overline{U}_\infty$ の結果と同様に、No 4 と No 5 の Cold panel 後流では、床面近傍よりも上空の値が大きい。

5. ま と め

(1) Hot panel だけ床板に設置される場合、床面温度が高くなるほど床面近傍の最大濃度は減少し、上空の値が増大する。

(2) Hot panel の隣りに Cold panel が設置されると、Cold panel によって生じた冷塊のために Hot panel からの上昇気流は冷塊に押し上げられ、その最大濃度は床面で発生せず上空に移動する。

(3) 模型形状は、床面温度分布が Hot panel のみの場合、拡散に対して大きな影響を及ぼす。しかし、Hot panel の隣りに Cold panel が設置されると Cold panel 上空から後流にかけて発生した冷塊域のために模型形状の影響は減少する。

(4) 煙突位置は、床面温度分布が(暖+冷+暖)の場合、拡散に対して余り大きな影響を及ぼさない。

(1977年8月26日受理)

記 号

| | | |
|--------|------------------------|---|
| K_M | : 運動量の拡散係数 | [m^2/s] |
| g | : 重力加速度 | [m/s^2] |
| L | : Monin—Obukhov Length | [m] |
| k | : カルマン係数 | |
| u_* | : 摩擦速度 | [m/s] |
| H | : 鉛直方向の熱流束 | [$\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$] |
| ρ | : 密度 | [kg/m^3] |
| C_p | : 定圧比熱 | [$\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$] |

| | | |
|-------------------------|--|--|
| \overline{U} | : 平均風速 | [m/s] |
| \overline{U}_∞ | : $X = -110\text{mm}$, $Z = 400\text{mm}$ における \overline{U} | [m/s] |
| $\overline{U}_{Met.}$ | : 気象庁高さでの \overline{U} | [m/s] |
| $\sqrt{\overline{u}^2}$ | : X 方向の乱流速度 | [m/s] |
| $\sqrt{\overline{w}^2}$ | : Z 方向の乱流速度 | [m/s] |
| $-\rho\overline{uw}$ | : 鉛直方向の運動量流束 | [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$] |
| α | : 対流熱伝達率 | [$\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$] |
| \overline{T}_A | : 空気の平均ポテンシャル温度 | [$^\circ\text{K}$] |
| T_s | : 地表面温度 | [$^\circ\text{C}$] |
| ΔT_s | : Approach flow と地表面の温度差 | [$^\circ\text{C}$] |
| $T(Z)$ | : 高さ Z の温度 | [$^\circ\text{C}$] |
| $\overline{T}(Z)$ | : $T(Z)$ の高さ方向の平均値 | [$^\circ\text{C}$] |
| $\Delta T(Z)$ | : [$T(Z) - (X = -110$ における $\overline{T}(Z))$] | [$^\circ\text{C}$] |
| δ | : 境界層厚さ, $\delta = 400\text{mm}$ | [mm] |
| C | : 平均濃度 | [ppm] |
| C_o | : 規格化濃度, $C_o = V/(H_s^2 \cdot \overline{U}_s)$ | [ppm] |
| V | : トレーサーガスの発生量 | [cc/s] |
| H_s | : 煙突高さ, $H_s = 40\text{mm}$ | [mm] |
| \overline{U}_s | : 煙突高さでの \overline{U} | [m/s] |
| Suffix | : () _m : モデル () _p : 実物 | |

参 考 文 献

- 1) 土屋巖: 緑地と都市気候, 水利科学, 16(1), 29-56, 1972
- 2) 西沢利栄: 熱汚染, 三省堂選書 6, 1977
- 3) S. Sethu Raman, J. E. Cermak: Physical modeling of flow and diffusion over an urban heat island, Adv. Geophys., 18B, 223-240, 1974
- 4) J. E. Cermak: Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA, 9, 9, 1746-1754, 1971
- 5) A. C. Monin., A. M. Yaglom: 統計流体力学 2, 総合図書, 1976
- 6) 村上, 大場: 床面に温度差のある成層流の気流性状並びに拡散に関する風洞実験, 日本建築学会関東支部, 153-156, 1977
- 7) H. Fujita, L. S. G. Kovasznay: Measurement of Reynolds stress by a single rotated hot wire anemometer, Rev. Sci. Inst., 39, 9, 1351-1355, 1967