

都市における地表面温度差の物質拡散に及ぼす影響 に関する実験的研究

大場正昭* 村上周三**

Experimental Study about the Effects of Ground Surface Temperature Difference on Gaseous Diffusion in Built-up Area

Masaaki OHBA* Shuzo MURAKAMI**

This paper describes the effects of the ground surface temperature difference on gaseous diffusion in built-up area by field experiments and by the wind tunnel investigations.

In the field experiments, the black panels with high absorbance of solar radiation were used as the model of the ground surface to produce the fully developed thermal boundary layer. It has been confirmed from the field experiments as follows;

(1) the thermal boundary layer is sufficiently developed in small-scale experiments by using the panels;

(2) the turbulent intensity of the air flow on the panels becomes larger in proportion to the total solar radiation on a horizontal plane.

In the wind tunnel investigations, the thermal boundary layer observed in the field experiments was simulated by using the hot panel with electrical heaters. The other thermal boundary layers generated by the difference of the surface temperature were studied by changing the arrangement of the panels. For example, the cool surface zone in "parks and green belts" was also simulated by the cold panel with cold water. The tracer gas was emitted from the stack upwind of the hot panel in order to clarify the effects of the surface temperature difference on gaseous diffusion. It has been confirmed from the wind tunnel investigations as follows;

(3) in the case of setting only the hot panel in the wind tunnel, when the temperature difference between the oncoming air and the surface of the hot panel becomes larger, the maximum concentration on the floor decreases gradually;

(4) when the cold panel is set on the leeward of the hot panel, a large cooled air region is generated on the cold panel. As the result, the maximum concentration appears at higher position from the ground surface than in the case of setting only the hot panel.

List of Symbol

I ···· total solar radiation on horizontal plane

* 建築学科 助教授

** 東京大学生産技術研究所 助教授
昭和 57 年 9 月 25 日受理

ΔT_s ···· difference of surface temperature between panel and lawn

\bar{U} ···· longitudinal velocity component of oncoming flow

$\bar{U}(Z=6m)$ ···· longitudinal component of
 \bar{U}_∞
 \bar{U}_∞ ···· mean wind velocity of onco-
 ming flow at height of 6 m
 u, v, w ···· turbulent components of ve-
 locity in x, y and z directions
 x, y, z ···· spatial coordinates in the wi-
 ndward, crosswind and ver-
 tical directions
 $\sqrt{\bar{u}^2}, \sqrt{\bar{v}^2}, \sqrt{\bar{w}^2}$ ···· standard deviations of $u,$
 v and w , respectively
 $\Delta T(Z)$ ···· temperature difference profile
 of air flow in field experi-
 ments
 $\Delta T(Z) - [\bar{T}_X \text{ at } X = -1.5 \text{ m}]$
 $T(Z)$ ···· temperature at height of Z
 \bar{T}_X ···· mean value of $\sum T(Z)$ at po-
 sition of X
 L ···· Monin-Obukhov Length
 u_* ···· friction velocity
 k ···· von Kármán's constant
 g ···· gravitational acceleration
 \bar{T}_a ···· average temperature in boun-
 dary layer
 H ···· vertical heat flux
 ρ ···· air density
 C_p ···· specific heat at constant pre-
 ssure
 α ···· convection heat-transfer coe-
 fficient
 $\bar{U}_{Met.}$ ···· mean wind velocity measu-
 red at Tokyo Met. Observa-
 tory
 ΔT_{s_i} ···· temperature difference bet-
 ween oncoming air and
 ground surface
 C ···· mean concentration at mea-
 suring point

$$C_0 = V / [H_s^2 \cdot \bar{U}_s]$$

V ···· emission rate of tracer gas
 H_s ···· stack height, $H_s = 40 \text{ mm}$
 \bar{U}_s ···· mean wind velocity at stack
 height
 δ ···· boundary layer thickness,
 $\delta = 400 \text{ mm}$
 \bar{U}_0 ···· mean wind velocity measu-
 red at height of δ
 $\Delta T(Z)_*$ ···· temperature difference profi-
 le of air flow in wind tun-
 nel experiments
 $\Delta T(Z)_* = T(Z) - [\bar{T}_X \text{ at}$
 $X = -110 \text{ mm}]$
 Suffix ···· ()_m : model
 ()_p : prototype

1. はじめに

都市の地表面は、建物・道路・公園緑地・池水等に覆われているが、建物・道路と公園緑地・池水間の表面温度差は真夏時に 20 deg C ~ 30 deg C にも達する。特に、上空の風が弱いときには局部的な気流が生じ、汚染空気の流れに大きな影響を与える^{1,2)}。

本報では、まず地表面のモデルとして高い日射吸収率を持つベニヤ板(野外模型)を地表に並べ、ベニヤ板近傍に形成される温度境界層の気流性状を測定した。次に、この温度境界層を風洞内で高温パネルを用いてモデル化し、公園緑地の低温部を示す低温パネルと組み合わせて、地表面温度差の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. 野外模型実験

平坦な芝生上に、日射吸収率を高めるために外表面を黒色に塗ったベニヤ板を 9 m × 9 m (野外模型) に敷き、ベニヤ板近傍に形成される温度境界層の気流性状を日射量との関連から調べた。

2.1 実験概要³⁾

(1) 野外模型：寸法 9 m × 9 m のベニヤ製で、

ベニヤ板の裏側には厚さ 2 cm のスタイロフォームを貼って断熱した。また、模型の表面には、表面での乱流化を促進するために高さ 10 cm のラフネスを 30 cm 間隔で設置した。写真-1 に模型の設置状況を示す。

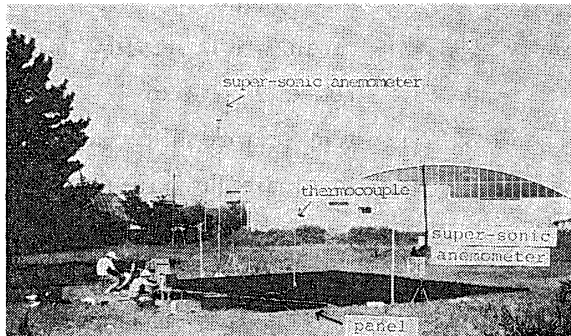


Photo. 1 View of the field model experiments

(2) 測定方法: Fig. 1 に示すように、模型から 1.5 m 離れた位置に高さ 6 m のポールを立て、アプローチフローの垂直風速分布を高さ 1 m, 2 m, 6 m の位置で連続測定した。計測器は超音波風速計である。さらに、模型上の $X=4.5$ m と $X=9$ m では、1 台の超音波風速計を移動させながら高さ 0.4 m, 1.0 m 及び 1.5 m で風速と乱れを測定した。温度については、Cu-Co 熱電対により空間の温度分布 (44 点) と地表面温度 (2 点) を、日射量については、エプリ日射計により水平面全天日射量を連続測定した。実験は日射量と風向が安定しているときを選び、9 月~10 月に 5 日間行った。

2.2 実験結果と考察

(1) 日射量と地表面温度差の関係

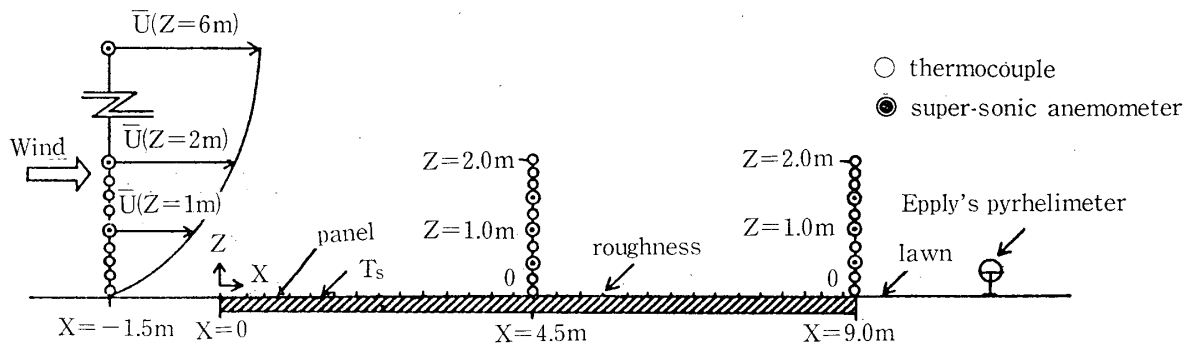


Fig. 1 Measured points in the field model experiments

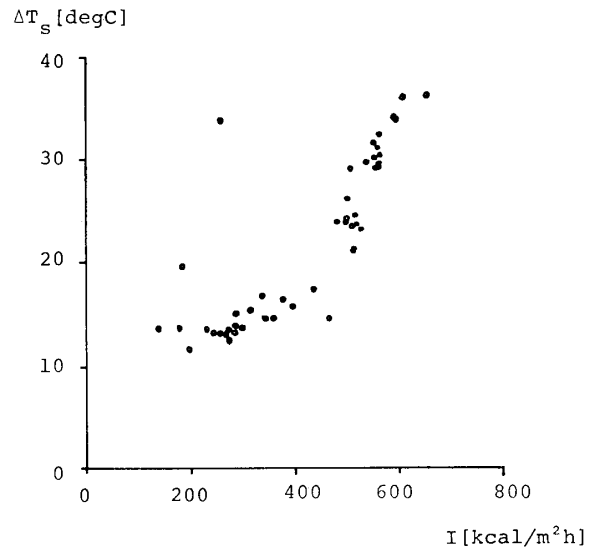


Fig. 2 Relation between the surface temperature differences and the total solar radiations on a horizontal plane

上空風速 \bar{U} ($Z=6$ m) が 1 m/s~3 m/s の範囲のとき、模型と芝生の表面温度差 ΔT_s と水平面全天日射量 I の関係を調べた。Fig. 2 に結果を示す。データのサンプル時間は 5 分間である。図より I の増加とともに ΔT_s も増大する傾向にあり、 I が $600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 程度でも $\Delta T_s = 30 \text{ deg C}$ に達することが判る。

(2) 地表面温度差と温度境界層厚さの関係

Fig. 3 と Fig. 4 にアプローチフローの垂直風速分布と模型上の垂直温度分布の例を示す。測定場所の周辺には低層建物が点在するので、風速分布は $1/3.5$ 乗則に従い、乱れの強さは高さ 1 m で $\sqrt{u^2}/\bar{U}$ ($Z=6$ m) $\approx 0.3 \sim 0.4$ であった。Fig. 4 で、

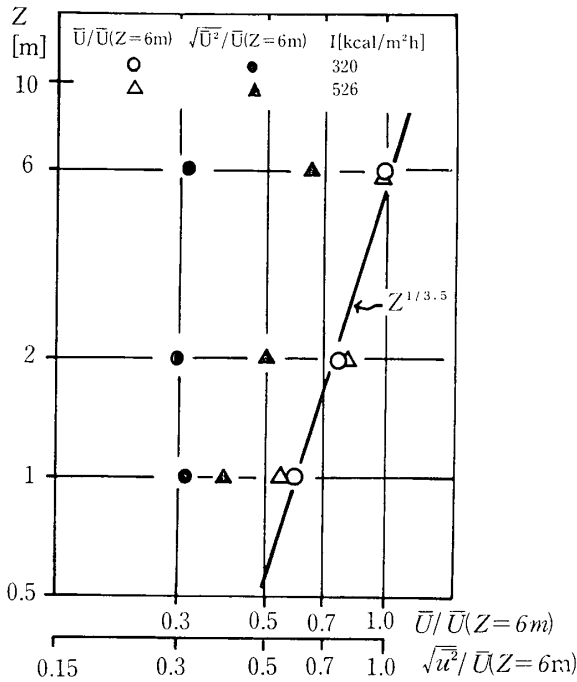


Fig. 3 Wind velocity and turbulent intensity profiles of the oncoming flow in the field model experiments

温度境界層の厚さを $\Delta T(Z) \doteq 0 \text{ deg C}$ の線で示せば、境界層の厚さは模型上になるに従い増大し、 $X=4.5 \text{ m}$ の位置で $Z \approx 1 \text{ m}$ に達する。

(3) 模型近傍の気流の乱れと日射量の関係

Fig. 5 に $X=4.5 \text{ m}$ と $X=9 \text{ m}$ の $Z=1.5 \text{ m}$ における気流の乱れ $\sqrt{u^2}/\bar{U}_\infty$, $\sqrt{v^2}/\bar{U}_\infty$, $\sqrt{w^2}/\bar{U}_\infty$ と水平面天日射量 I との関係を示す。日射量の増加とともに模型表面から放出される熱量が増加するため、模型近傍の気流の乱れは日射量に比例す

る傾向にある。

3. 風洞模型実験

小規模な野外模型実験でも地表面の日射吸収率の大小により地表面間で温度差が生じ、その結果として、模型近傍に温度境界層が形成されることが確認された。次に、この温度境界層を風洞内で高温パネルを用いてモデル化し、さらに公園緑地の低温部を表わす低温パネルと組み合わせて、パネル温度差が物質拡散と気流性状に及ぼす影響について風洞実験により検討した。

3.1 風洞模型実験のための相似則

模型の幾何学的な相似とアプローチフローの相似は、一応、満足されているものとし⁶⁾、床面の境界条件の相似のみ考えた^{7,8)}。ここでは条件として、Monin-Obukhov Length

$$L = -u_*^3 / [k \cdot (g/\bar{T}_a) \cdot (H/\rho \cdot C_p)] \quad (1)$$

を長さ Z で無次元化した

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

すなわち

$$\frac{H_p}{H_m} = \frac{Z_m}{Z_p} \cdot \frac{(\bar{T}_a)_p}{(\bar{T}_a)_m} \cdot \left(\frac{u_{*p}}{u_{*m}}\right)^3 \quad (2)$$

を 2, 3 の仮定の下に

$$\frac{(\alpha \cdot \Delta T_s)_p}{(\alpha \cdot \Delta T_s)_m} = \frac{Z_m}{Z_p} \cdot \left(\frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_m}\right)^3 \quad (3)$$

に変形して用いた。

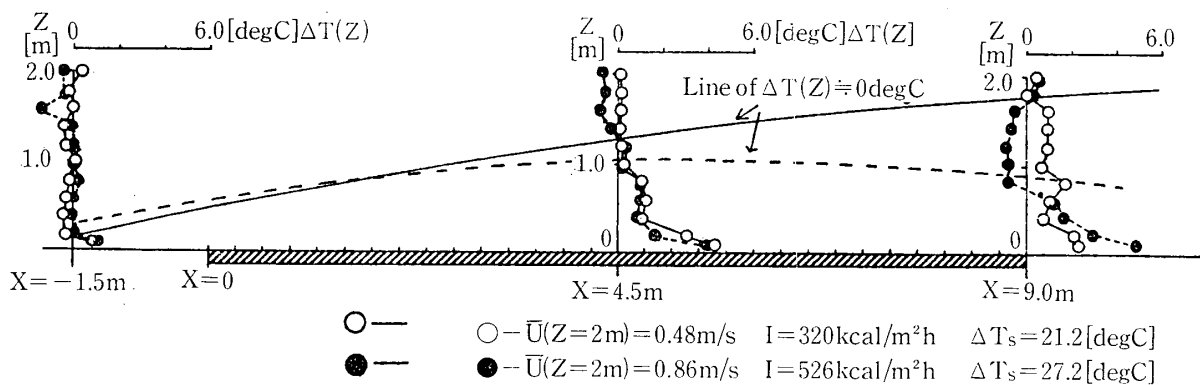


Fig. 4 Development of the thermal boundary-layer thickness on the panel

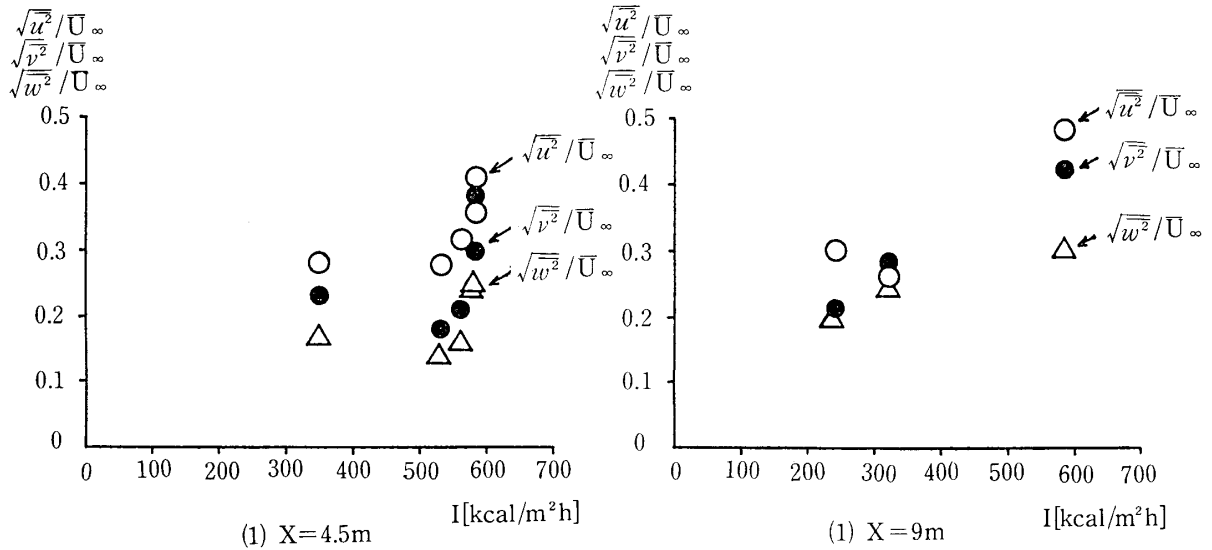


Fig. 5 Relation between the turbulent intensities of the air flow on the panel and the total solar radiations on a horizontal plane

3.2 実験概要

3.2.1 実験装置

(1) 風洞: Fig.6 に風洞を示す. 風洞は測定

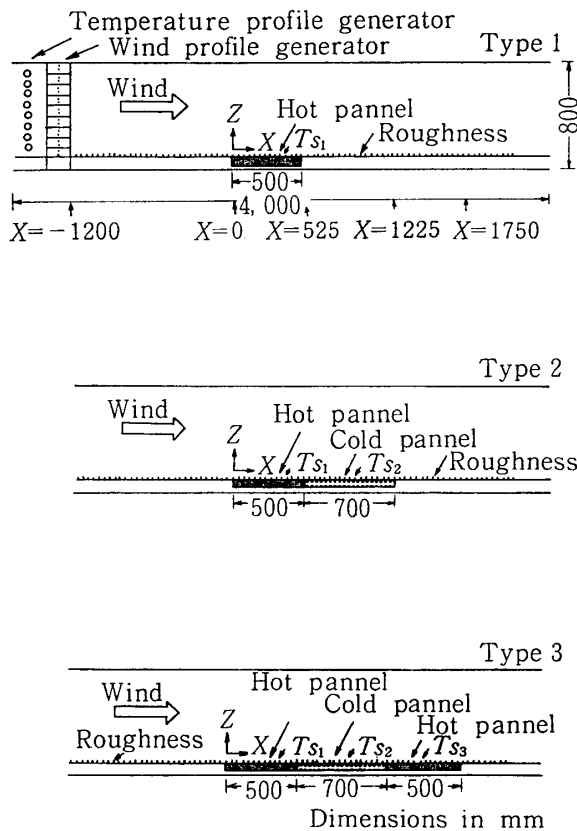


Fig. 6 Schematic wind tunnel and the arrangement of floor panels

部長さ 4 m, 断面 0.8 m × 0.8 m である. 測定部の風上側には温度成層形成装置と速度成層形成装置が, 床面には高温パネルと低温パネルが組み合わせて配置されている.

(2) 模型: 街区を 2 次元のフェンスでモデル化した. フェンスの形状は高さ 40 mm, 厚さ 8 mm, 幅 800 mm. 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), 及び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 = -110 mm に, 連続フェンスは X = -110 mm から 160 mm 間隔で 14 個並べた.

3.2.2 実験条件

(1) 実物の境界条件の設定: 気象庁高さの風速を $(\bar{U}_{Met})_p = 5.0$ m/s, 地表面とアプローチフローの温度差を $(\Delta T_{s1})_p = 0, 24, 43$ deg C, $(\Delta T_{s1})_p = 0, -8$ deg C, $(\Delta T_{s3})_p = 0, 24, 43$ deg C, 対流熱伝達率を $\alpha_p = 30$ kcal/m²·h·deg C と想定する.

(2) 風洞内の境界条件の設定: 風速を $(\bar{U}_{Met})_m = 0.85$ m/s, 対流熱伝達率を高温パネルと低温パネルを含めた平均値として $\alpha_m = 14$ kcal/m²·h·deg C⁴⁾, 形状比を 1/250 とすれば, 風洞床面の表

面温度は式 (3) から実物の $(\Delta T_s)_p$ に対応して求まる. Fig. 7 にアプローチフローの垂直風速分布を示す. 風速分布のべき指数は $1/2.1$ と野外実験のべき指数 $1/3.5$ と比較し大きいので, 野外実験との厳密な対応は難しい.

なお, アプローチフローの風速と温度は, 床面上の模型を設置しない状態で $X = -110 \text{ mm}$, $Z = 200 \text{ m}$ (気象庁高さに相当) を基準点に選んで設定した.

3.2.3 実験種類

Table 1 に実験種類を示す. 床面温度分布は Fig. 6 に示すように, Type 1 (高温パネルのみ), Type 2 (高温パネル+低温パネル), Type 3 (高温+低温+高温) の3タイプ. 模型の配置形状は平板のみ, 単一フェンス, 連続フェンスの3タイプである.

3.2.4 測定方法

アプローチフローの風速を一定にし, 床面温度分布と模型の配置形状を変化させて実験した. 風速は温度補償型熱線風速計, 温度は Cu-Co 熱電対により測定した. 濃度については, C_2H_4 ガス

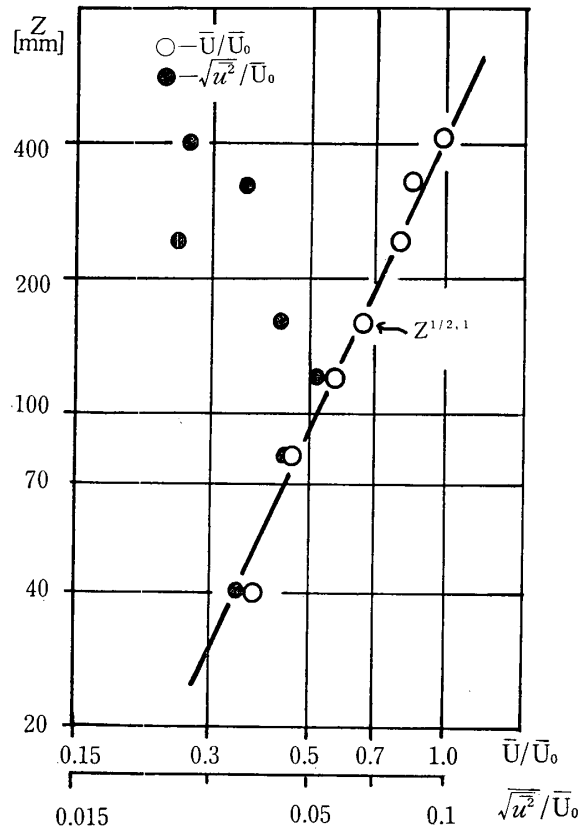


Fig. 7 Wind velocity and turbulent intensity profiles of the oncoming flow in the wind tunnel experiments

Table 1 Experimental conditions

Exp. No.	Field experiments				Wind tunnel experiments				Arrangement of floor panels	Arrangement of fences
	$\bar{U}_{Met.}$ [m/s]	ΔT_{s_1} [deg C]	ΔT_{s_2} [deg C]	ΔT_{s_3} [deg C]	$\bar{U}_{Met.}$ [m/s]	ΔT_{s_1} [deg C]	ΔT_{s_2} [deg C]	ΔT_{s_3} [deg 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	

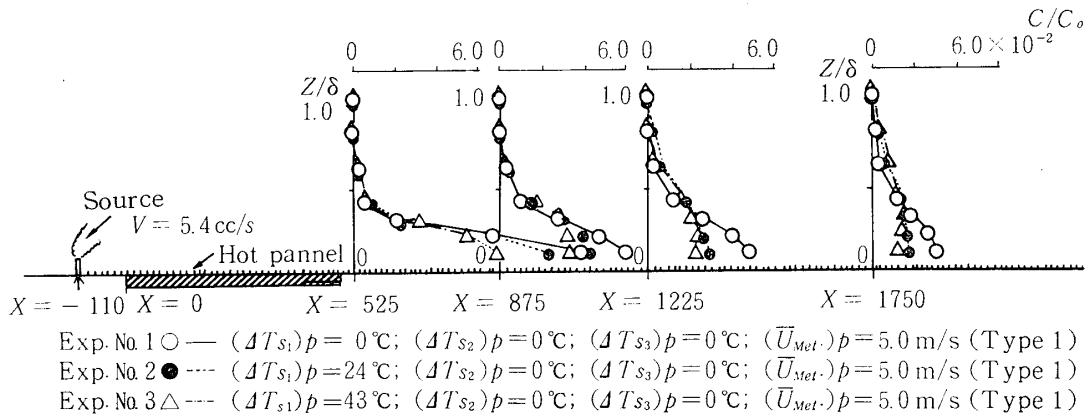


Fig. 8 Effect of the arrangement of the floor panel (type 1) on gaseous diffusion

(濃度 100%) を煙突 (床面からの高さ 40 mm, 内径 4 mm^φ) から煙突高さでの風速と一致させて放出し, 炭化水素分析計により測定した.

3.3 実験結果と考察

実験は 11. タイプ行ったが, 主要な結果だけ以下に述べる.

3.3.1 拡散に対する床面温度分布の影響

(1) 床面温度分布 Type 1: Fig. 8 に高温パネルのみ加熱した場合を示す. 野外実験との対応については, 風速条件は異なるが Exp. No. 2 と Fig. 4 のデータ間とで温度条件が対応する. 図よりアプローチフローとパネル表面との温度差 ΔT_{s1} が大きくなるほど, 高温パネルからの上昇気流は強まる. 従って, 床面近傍の最大濃度は減少し, 逆に上空の濃度が増大する.

(2) 床面温度分布 Type 1, 2, 3 の比較:

Fig. 9 に結果を示す. 高温パネルの隣りに低温パネルが設置されると, 低温パネル上空から後流にかけて大きな冷塊域が形成される. そのため, トレーサーガスは上空へ押し上げられ, 低温パネルのある No. 4 (高温+低温) と No. 5 (高温+低温+高温) では, 最大濃度の発生位置が高温パネルのみの No. 3 と比較し上昇する. これより, 公園緑地の作用として, 周辺の地表面温度が高い所で発生した汚染空気を上空に移動させることが予想される.

3.3.2 気流性状に対する床面温度分布の影響

Fig. 10 に前項の床面温度分布に対応する気流性状を示す.

(1) \bar{U}/\bar{U}_0 : 高温パネルの隣りに低温パネルが設置される No. 4 と No. 5 では, 低温パネル後流 $X=1225 \text{ mm}$ と 1750 mm 付近の風速分布

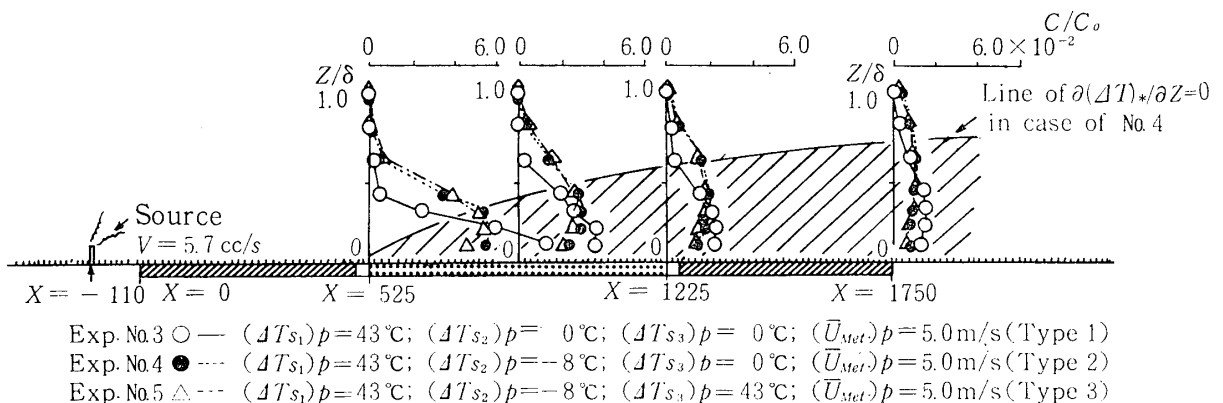


Fig. 9 Effect of the arrangement of the floor panels (type 1, type 2, type 3) on gaseous diffusion

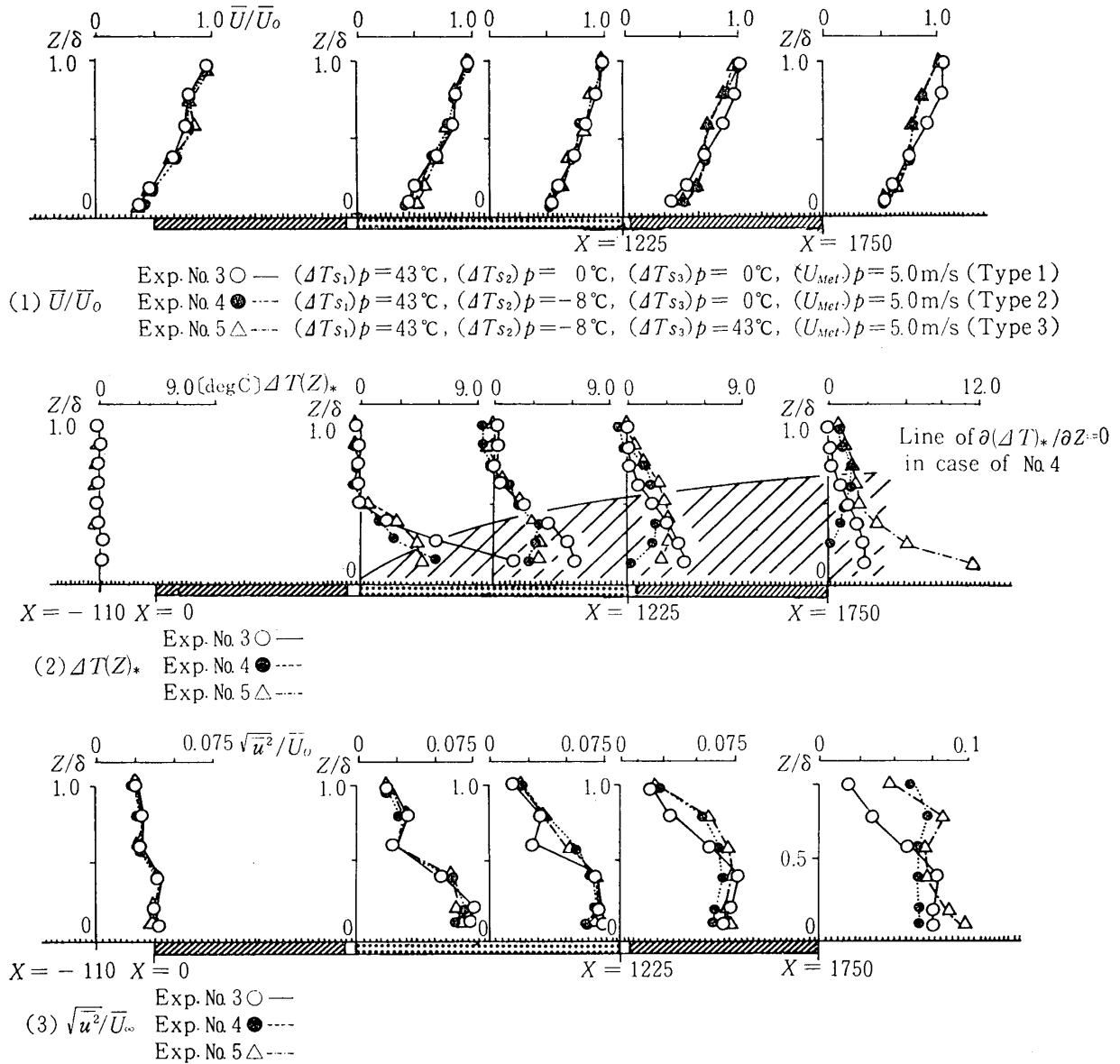


Fig. 10 Effect of the arrangement of the floor panels on air-flow characteristics

が冷塊域の影響で中央部分で窪んだ形になる。

(2) $\Delta T(Z)^*$: 低温パネルの影響を $\frac{\partial(\Delta T)^*}{\partial Z}$
 $=0$ の線で示せば, No. 4 のとき $\frac{\partial(\Delta T)^*}{\partial Z}=0$ の
 線は $X=1750\text{ mm}$ の所で $Z/\delta=0.75$ まで達し,
 低温パネルの影響がかなり後流まで及ぶことが判
 る。

(3) $\sqrt{u^2}/\bar{U}_0$: 低温パネルのある No. 4 と
 No. 5 では, 風上の高温パネルから発生する上昇
 気流が冷塊に妨げられて上空へ移動する. 従っ
 て $X=1750\text{ mm}$ の位置では床面近傍と同様に上

空の乱れも大きくなる。

以上の気流性状の結果からも, 低温パネルによ
 り形成された冷塊域が原因で, 風上側で発生した
 熱い空気は低温パネルの位置に来ると上空へ移動
 することが確認された。

3.3.3 拡散に対する模型の配置形状の影響

街区を想定したフェンスを温度差がある床面に
 配置し, 拡散に対する模型の配置形状の影響を調
 べた. Fig. 11 に結果を示す。

(1) 床面温度分布 Type 1: フェンス列の設
 置により, 高温パネルからの上昇気流が増大する

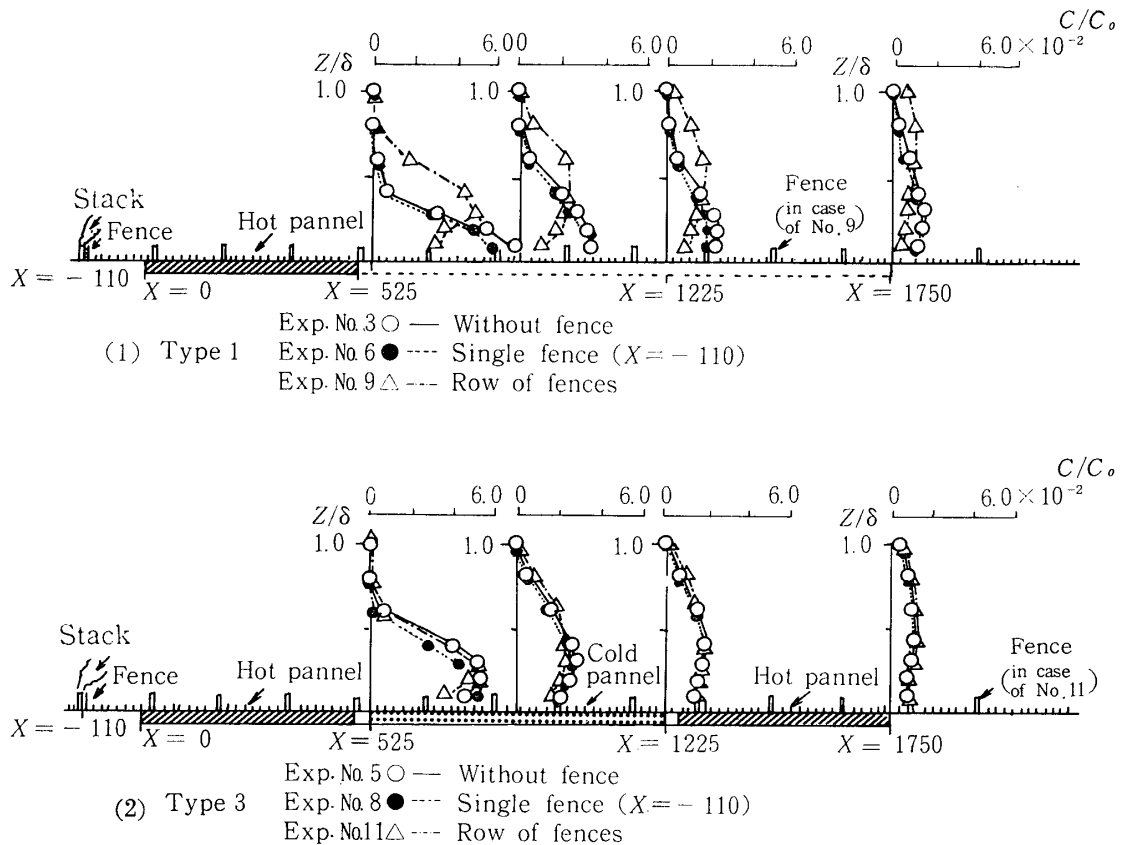


Fig. 11 Effect of the arrangement of the roughness elements in the ground level on gaseous diffusion

ため、連続フェンス (No. 9) の場合、フェスなし (No. 3) と比較してフェンス近傍の濃度は減少し、上空の濃度が増大する。従って、中高層建物が建ち並ぶ市街地では、真夏時には郊外に比べ地表面からの熱放出が大きくなり、その結果、自動車やビルの煙突から排出される汚染ガスは、街区内に滞留せず上空に移動することが予想される。

(2) 床面温度分布 Tape 3 : Fig. 11 (2) に示すように、この床面温度分布では模型の配置形状による差は明瞭でない。原因としてはフェンスなし (No. 5) と単体フェンス (No. 8) の場合、冷塊域の影響で最大濃度が上空に移動し、その結果、連続フェンス (No. 11) の分布と似たパターンになるからである。

4. まとめ

風洞模型実験と野外模型実験との比較については十分な検討がなされていないが、これらの実験

から地表面温度差の物質拡散と気流性状に及ぼす影響について、以下の定性的な結果を得た。

(1) 9 m 四方の小規模なベニヤ板からなる野外模型でも、芝生との日射吸収率の違いにより温度境界層がベニヤ板近傍に形成され、かつ、その境界層の厚さは厚い。

(2) 日射によりベニヤ板表面の温度が芝生温度よりも高くなるので、ベニヤ板近傍の気流の乱れは水平面全天日射量に比例する傾向にある。

(3) 野外実験で観測した温度境界層を風洞内の高温パネルを用いて再現した。これより風洞気流とパネル表面の温度差が大きくなるに従い、床面の最大濃度は減少し、逆に上空の濃度が増大する。

(4) 公園緑地を表わす低温パネルを高温パネルの隣りに設置すると、大きな冷塊域が低温パネル上に形成される。そのため、最大濃度の発生位置は高温パネルのみの現象と比較し、上空に移動

する。

References

- 1) I. Tsuchiya, "Green belts and urban climate," *Water Sci.*, No. 16(1), 29-56, 1972.
- 2) T. Nishizawa, "Thermal pollution," *Sanseido Sensho*, No. 6, 1977.
- 3) S. Murakami, M. Ohba, "Effect of surface temperature difference on air-flow characteristics," report of the annual meeting of the Architectural Institute of Japan, September, 1978.
- 4) S. Murakami, M. Ohba, "Wind tunnel experiment about air-flow characteristics and gaseous diffusion on flat plates with surface temperature difference," *Transact. of the Architectural Institute of Japan*, 153-156, 1976.
- 5) S. Murakami, M. Ohba, "Wind tunnel experiment about gaseous diffusion on flat plates with surface temperature difference," *Journal of Institute of Industrial Science, Uni. of Tokyo*, Vol. 29, No. 11, 106-111, 1977.
- 6) J. E. Cermak, "Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer," *AIAA*, Vol. 9, No. 9, 1746-1754, 1971.
- 7) S. Sethu Raman, J. E. Cermak, "Physical modeling of flow and diffusion over an urban heat island," *Adv. Geophys.*, No. 18B, 223-240, 1974.
- 8) A. C. Monin, A. M. Yaglom, *Statistical hydrodynamics*, Sōgōtoshō, 1976.