

都市における熱的環境に関する研究 (その6)

——風洞気流中における熱拡散実験——

岡 建 雄

Research on Thermal Environments in Urban Areas (Part 6)

——Experimental Study of Thermal Diffusion in Wind Tunnel——

Tatsuo Oka

Abstract

Reports of experiments, actual measurements and theoretical calculations have been individually presented concerning thermal diffusion phenomena in urban atmospheres, but comparisons between calculations and experiments or actual measurement results have seldom been reported. In this paper, a thermal diffusion experiment made using a heat panel in a wind tunnel assumed as being an urban model is described. The contents of the paper consist of results of measurements of air flow over the model such as Reynolds stress, visualization of upward wind due to temperature gradient, and comparisons between measured and calculated temperature distributions. The calculated results are in good agreement with measured results, which shows that the calculation method can simulate thermal behavior in a wind tunnel.

概 要

都市大気中の熱拡散現象に関しては実験、実測及び理論計算による報告があるが、実験値あるいは実測値と計算値を比較照合したものは殆んど見当たらない。本報告は風洞中に発熱体を設置し、都市模型として熱拡散実験を行ったものである。その内容はレイノルズ応力等気流性状の測定、熱による上昇気流の可視化及び温度分布に関する実験値と計算値の比較である。計算結果は実験値とよく一致しており、風洞中の熱拡散現象を計算により再現できる事が確認された。

1. はじめに

都市から排出される熱は都市を覆う空気を暖め、ヒートアイランドを形成する。強いヒートアイランドの場合、市内外の温度差が10~12°Cに達する熱汚染となり、汚染物質の大気拡散及び都市居住環境に影響を与える事になる。このヒートアイランド現象に関しては実験、実測及び理論計算による報告があるが、実験値と計算値あるいは実測値と実測値を比較照合したものは物質拡散等に関しては多いものの、熱拡散に関しては少い様である。

本報告は風洞中に発熱面を設置し、都市模型として、熱拡散実験を行なったものである。その内容はレイノルズ応力等気流性状の測定、熱による上昇気流の可視化及び温度分布に関する実験値と計算値の比較照合である。

——記号——

C_p : 比熱 (kcal/kg°C)

D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数 (m²/s)

k: kármán 定数

l_z : Prandtl の混合距離 (m)

Q_s : 発熱面の出力 (kW)

R_i : Richardson 数

$R(r)$: 自己相関関数

U_∞ : 風洞中の一様気流の風速 (m/s)

u, v, w: x, y, z 方向の風速変位 (m/s)

u', v', w' : x, y, z 方向の変動風速 (m/s)

Z: 高さ (m)

zh: 粗度高さ (m)

Z_0 : 粗度定数 (m)

α_k : 定数

γ_z : 定数

2. 実験装置と測定方法

2.1. 風洞と発熱面

風洞はゲッチンゲン型で0.4×1.6 mの吹出断面と1.94 mの測定区間があり、0~4 m/sまで可変風速である。模型を設置した場合の吹出口断面での風速のばらつきは平均風速に対し、水平方向では±1.3%以内、垂直方向では下部-2.9%、上部+4%で、その間は大略直線的に変化している。乱れの強さは0.8~1.3%である。

風洞中は一様な粗度(zh=2.8 cm)が風洞気流と直角の方向に配列されており、中央の発熱面以外は28 mm角の木製角材である。風洞中央は60 cm角の発熱面で、発熱量は0~2 kWまで可変である。電熱線上部には3 mm厚の銅板を敷き、熱を均一に発生させると共に、その上に木製角材と同様の断面をもつ波型の0.5 mm厚の銅板を重ねて都市模型とした。

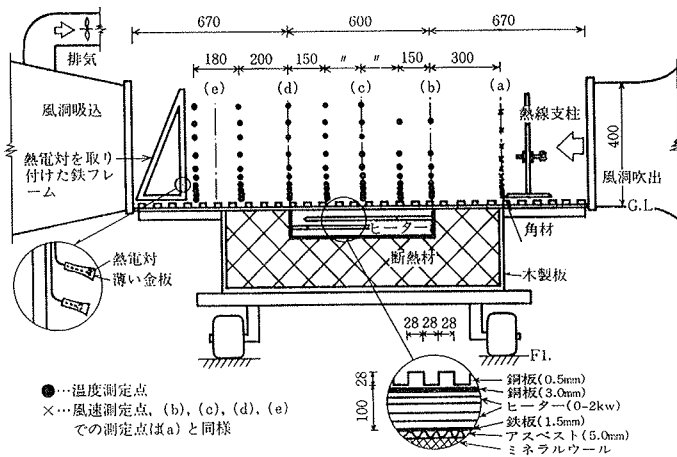


図-1 風洞中におかれた実験模型の断面図

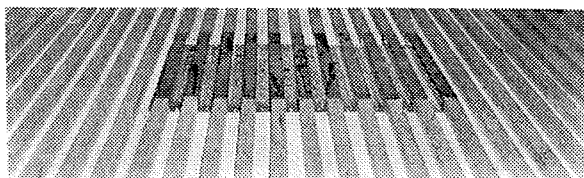


写真-1 発熱体実験模型

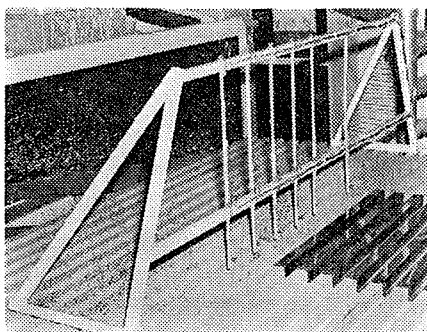


写真-2 温度測定器

2.2. 温度測定

鉄製フレームに熱電対を固定し、各測定面で24~48点、計168~250点の温度を測定した。熱電対の下側には極力輻射熱の影響を避けるために薄い金の板を設けた。表面温度は感温部が薄い金属板になっている表面温度計を発熱面に密着させて測定した。

2.3. 風速測定

風速計は温度補正付熱線風速計を用い、出力は26 m/sec間隔の瞬時値として紙テープに記録した。なお熱線の理論的扱いは文献⁴⁾に詳述されており、本実験もこれに従っている。

3. 実験結果

3.1. 模型上の気流性状

これは発熱させない場合($Q_s=0$)のもので、図-1~2の(c), (d), (e)点における測定結果である。

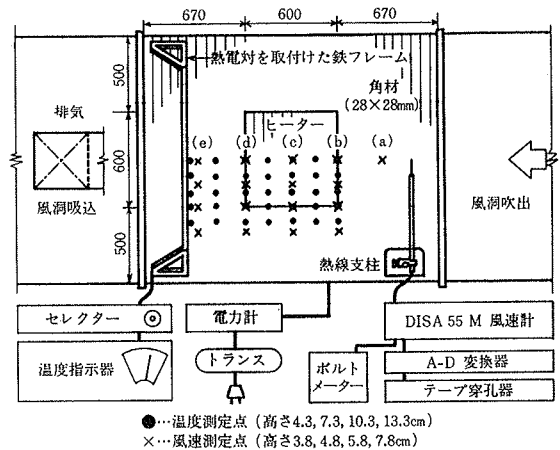


図-2 風洞中におかれた実験模型の平面図

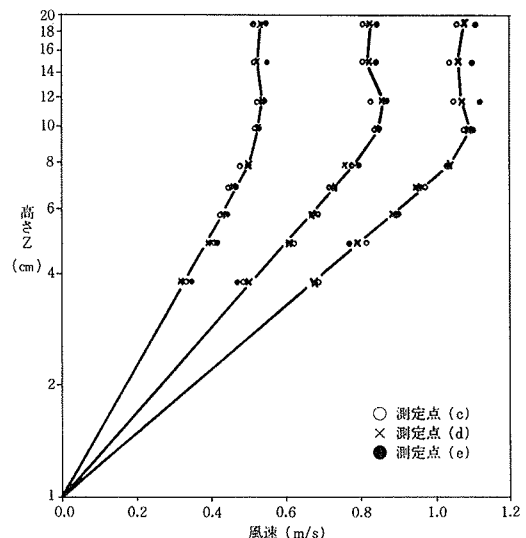


図-3 風速プロファイル

a. 平均風速と乱れの強さ

図-3に平均風速の垂直分布を示す。粗度高さは2.8 cmであり、粗度定数を1 cmとした場合の対数分布に一致している。各測定点、各 U_∞ において、 Z_0 は一定で、境界層厚は約 10 cm である。

図-4は乱れの強さの垂直分布である。乱れの強さは U_∞ による相異は少く、高さと共に減少するが、減少の割合は風速が低い程小さい。

b. レイノルズ応力と混合距離

図-5に U_∞ で無次元化したレイノルズ応力 $(-\overline{u'w'}) / U_\infty^2$ の垂直分布を示す。 $-\overline{u'w'} / U_\infty^2$ はある高さまで大略一定で、 U_∞ 及び測定点による相異は少い。 $-\overline{u'w'}$ が一定である高さは U_∞ が小さくなる程、高くなる。 Prandtl の混合距離 l_z は次式により算出され、結果を図-6に示す。

$$l_z = \sqrt{-\overline{u'w'}} / \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(1)$$

l_z は U_∞ による相異も少く、ある高さまでは高さに正比例しており、次式で近似できる。

$$l_z = \alpha_k \cdot z \simeq 0.11z \quad \dots\dots\dots(2)$$

α_k は Kármán 定数 k ($\simeq 0.4$) に比べて相当小さい。 α_k は自然風中では 0.35~0.41 の値となる事が報告されているが、粗度を設けた風洞中では 0.1~0.2 前後の値となる報告が多く⁵⁾、 $k \simeq 0.4$ より相当小さい事になる。

c. 拡散係数

次式により算出された垂直方向の拡散係数 D_z を D_z / U_∞ として、図-7に示す。

$$D_z = -\overline{u'w'} / \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(3)$$

D_z は大略高さに正比例して増大しており、測定点及び U_∞ による相異は少い。正比例する高さは U_∞ が小さい程高い。

次式により算出された水平方向の拡散係数 D_x を D_x / U_∞ として、図-8に示す。

$$D_x = \overline{u'^2} \int_0^{T_1} R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4)$$

T_1 : $R(\tau)$ がはじめて 0 になるまでの時間

D_x / U_∞ は高さと共に減少しており、測定点及び U_∞ による相異は少く、その傾向は乱れの強さとよく一致する。 D_x と D_z は分布型が異なるものの、その数値的オーダーは同程度である。

3.2. 煙を用いた可視化実験

U_∞ を 0.5, 0.75, 1.0 m/s に、模型発熱量を 0.6, 1.2, 1.8 kW に変化させ、計 9 例の熱拡散実験を行い、各々を比較した。写真-3は風洞吹出口近傍で煙を発生させ、

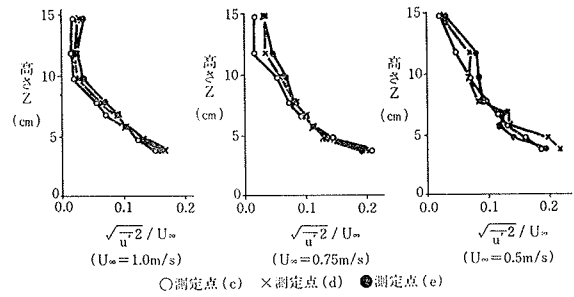


図-4 乱れの強さの垂直分布

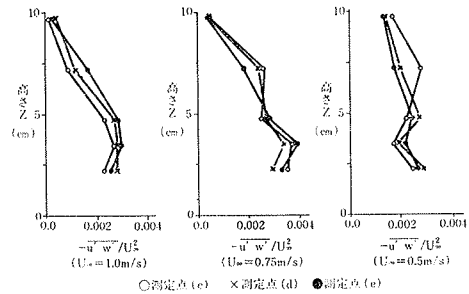


図-5 レイノルズ応力 $(-\overline{u'w'}) / U_\infty^2$ の垂直分布

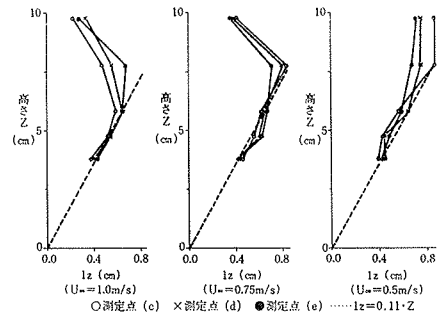


図-6 Prandtl の混合距離 (l_z) の垂直分布

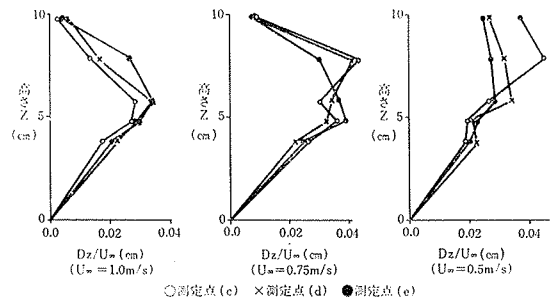


図-7 D_z の垂直分布

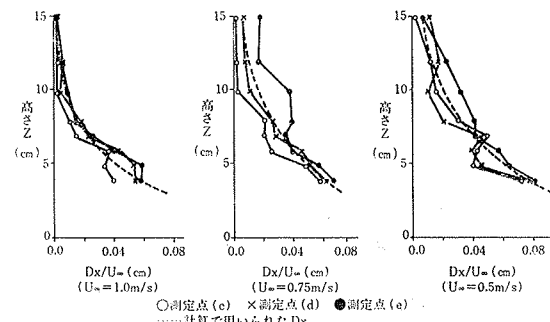


図-8 D_x の垂直分布

煙の軌跡によって熱気流の様子を把握しようとしたものである。煙の吹出速度の影響は発熱面上では無視できる程度であり、煙の軌跡も概ね安定したものであった。写真-3によれば、風速が1 m/sの場合、上昇気流は殆んどないが、0.75 m/s以下では発熱面後方で上昇気流が見出せる。上昇気流は U_∞ が小さい程、また発熱量が大きい程強いようである。発熱量が大きい場合、発熱面後方で煙の軌跡が薄くなっているが、これは温度が高くなると消散するという煙の性質のためで、熱気流等の攪乱によるものではない。

4. 温度分布に関する実験値と計算値の比較

4.1. 熱拡散理論による計算

a. 数値計算法

熱気流を考慮した熱拡散理論については既に報告しており、拡散項に関しては陽解法、風速項に関しては風上差分を用いて、N-S型の基礎方程式を数値計算により解いていくものである。

b. 拡散係数

水平方向の拡散係数 D_x に関しては理論的な取扱いが困難であり、またヒートアイランドは高さ方向に比べて水平方向に長いために、 D_x の影響は小さく、本報告では図-8に示される結果を用いている。

垂直方向の拡散係数に関しては、 R_i 数及び混合距離の関数とした次式を用いた。

$$D_z = l_z^2 \frac{\partial U}{\partial z} (1 - r_z R_i)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

(5)式は広い大気安定度に対して適用できるものとされており、定数 r_z は本報告においては100を選定した。

混合距離 l_z は図-6の結果を用いており、 $l_z = 0.11z$ である。但し境界層厚さや熱気流の影響を考慮して、 $Z > 20$ cmにおいては $l_z = 2.2$ cmと設定した。

4.2. 実験値と計算値の比較

U_∞, Q_s の異なる3例について、図-9~11に実験値と計算値の比較を示すが、水平及び断面温度分布図共に良好な一致を示している。数値計算による風速変位の最大値を図中に示すが、 u, v, w は同程度の値となっており、高さ9~11cmで上昇速度は最大になる。上昇気流の影響は U_∞ が1 m/sの場合、殆んど現われないが、0.75 m/s以下になると顕著である。

図-9~11の中に、各測定点における計算値と測定値の比較を示す。相関係数は0.95~0.97であり、良好な一致を示していると思われる。

5. 結 論

本報告は一樣粗度を設けた風洞中に60 cm角の発熱体を設置して熱拡散実験を行ない、温度分布に関して実験値と計算値を比較したものである。

(1) $Q_s = 0$ の場合の気流性状

風速プロファイルは $Z_0 = 1$ cmとした時の対数分布に一致し、混合距離はある高さまで、 $l_z = 0.11z$ と表現できる。境界層内ではレイノルズ応力は概略一定で、 D_z は、高さに正比例して増大する。一方、 D_x は高くなるに従い減少するが、 D_x, D_z の数値的オーダーは同程度である。

(2) 煙を用いた可視化実験

発煙実験による煙の軌跡から、 Q_s が大きい程また U_∞ が小さい程、熱による上昇気流は大きい事が認められ

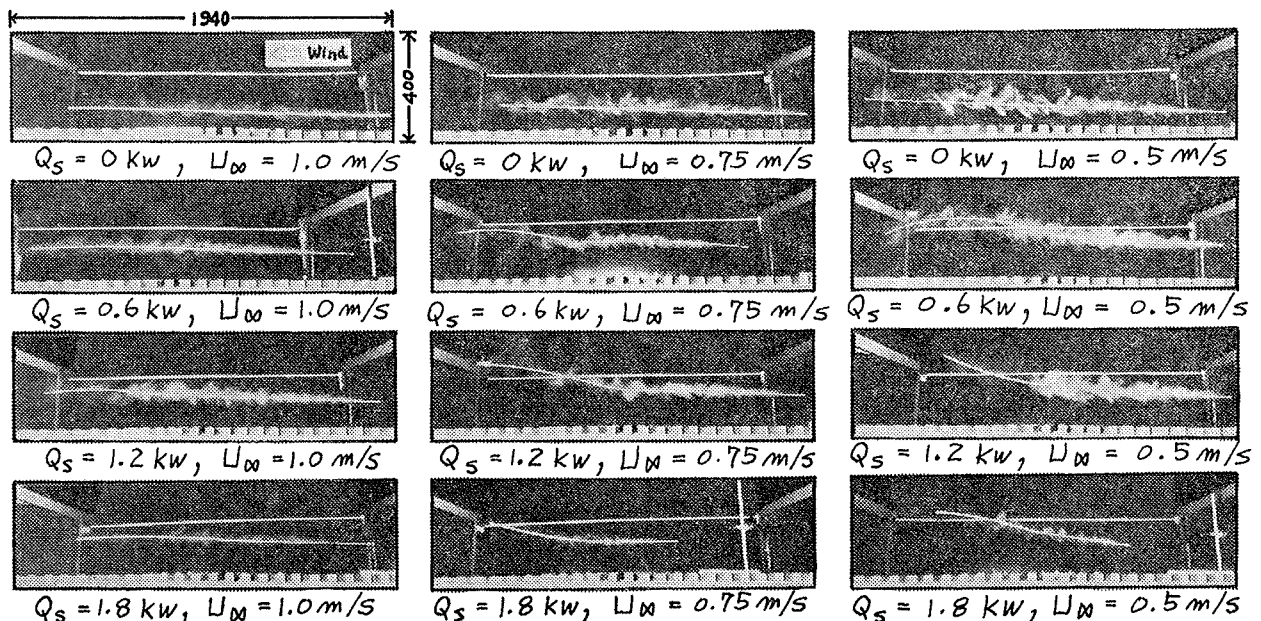
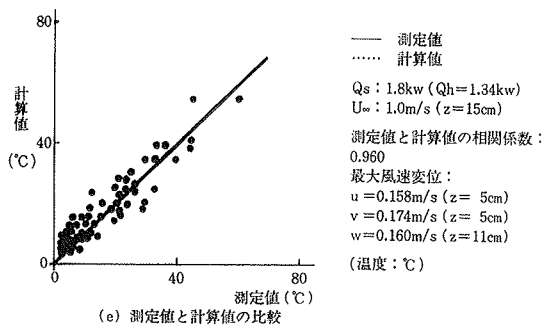
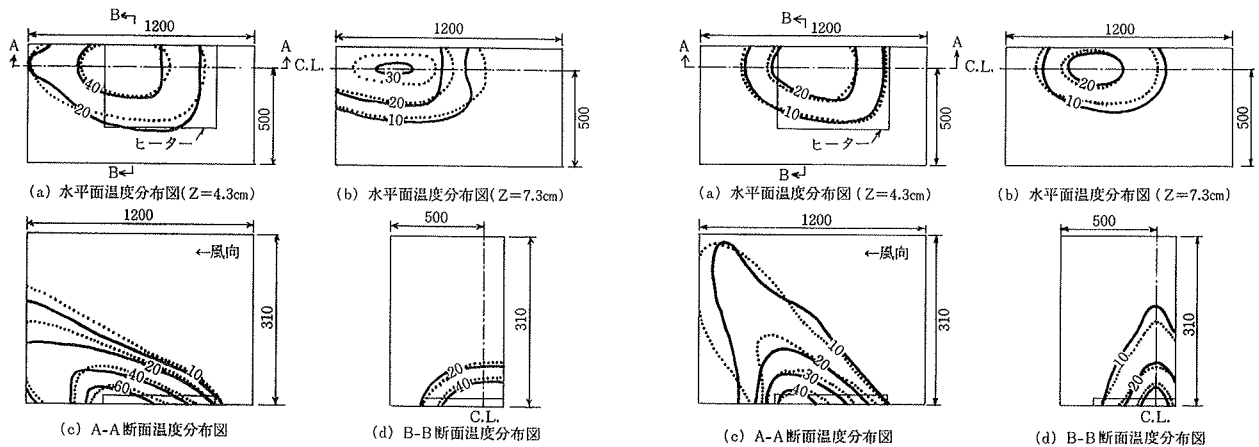
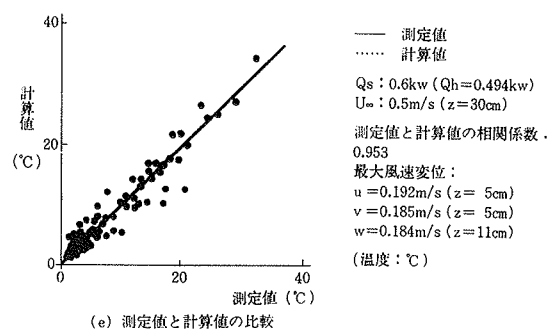
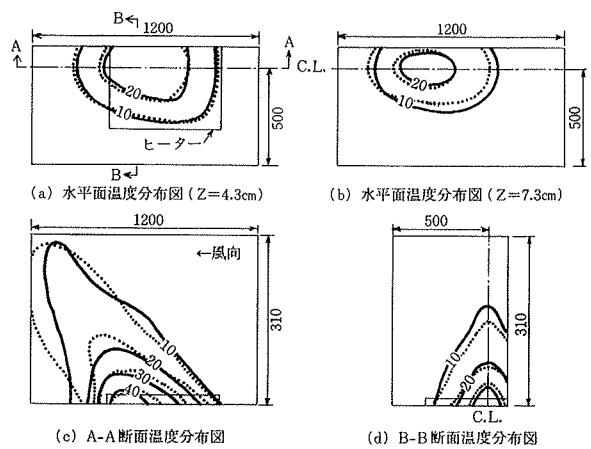


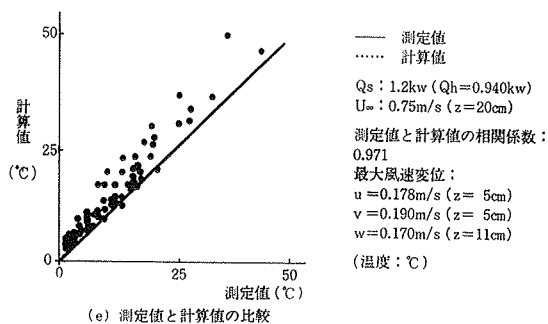
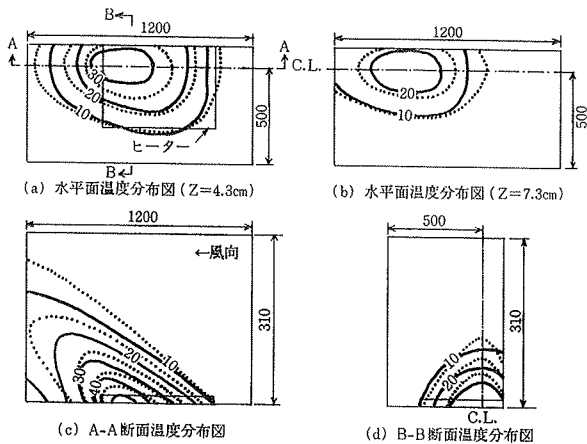
写真-3 発煙による熱気流の可視化実験 (白線は煙の軌跡の中心を示す)



図—9 温度分布に関する測定値と計算値の比較



図—11 温度分布に関する測定値と計算値の比較



図—10 温度分布に関する測定値と計算値の比較

る。

(3) 実験値と計算値の比較

測定された D_x, l_z 等を用いて、数値計算の結果と実験値を比較すると、相関係数が0.95~0.97の範囲内で一致し、等温線図も良好な一致を示した。

参考文献

- 1) 岡 建雄: 都市における熱的環境に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 9, (1974)
- 2) Yamamoto, G.: Theory of Turbulent Transfer in Non-Neutral Conditions, 気象集誌, (1959.4)
- 3) Mallinson, G. D. and G. de Vahl Davis: The Method of the False Transient for the Solution of Coupled Elliptic Equations, J. of Computational Physics, (1973.12)
- 4) Kristensen, H. S.: Hot-wire Measurements in Turbulent Flows, Fluid Mechanics Dept., Technical University of Denmark, (1973)
- 5) Counihan, J.: Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atm. Env. 7 (1973)