

都市における熱的環境に関する研究 (その5)

—自然風中における熱拡散実験(2)—

岡 建 雄
小 宮 英 孝

Research on Thermal Environments in Urban Areas (Part 5)

—Experimental Study of Heat Diffusion over Urban Model in Real Atmosphere (2)—

Tatsuo Oka
Hidetaka Komiya

Abstract

In succession to the previous report, a heat-generating device as an urban model was placed in real atmosphere to investigate temperature distributions. In this case, the heat-generating and measuring methods were modified and experimentation accuracy improved. Wind profiles and diffusivity factor profiles were observed for horizontal and vertical directions. The relation between wind speed and diffusivity factor was then given. Also, measured temperatures were compared with calculated temperatures by a numerical method using the relations in this experiment. Calculated results were in good agreement with experimental results in comparisons of these isotherms, in which the correlation coefficients between the results were from 0.88 to 0.98.

概 要

都市規模の熱環境を解析する一手法として、自然風中に発熱体を設置した熱拡散実験を前報に引き続いて行った。今回は発熱装置や測定方法に改良を加えて、実験精度を高めた。サーミスタ型風速計の風速データおよび熱拡散の差分式を模型上の温度分布に適用することにより、水平方向、垂直方向の拡散係数分布および風速と拡散係数の関係を求めた。この拡散係数分布を用いた、熱拡散理論に立脚した計算値と実験値を温度分布において比較したところ相関係数0.88~0.98で一致した。

1. はじめに

本報告は前報¹⁾に引き続き自然風中に発熱体を設置し、風速等気象条件と熱拡散現象との相関を見出し、熱拡散理論に立脚した計算値と比較照合したものであり、問題となっていた実験精度を発熱体や測定方法の改良により高めた前報をおきなうものである。

2. 実験装置と測定方法

実験装置は前報で用いたものと基本的には同一のものであるが、発熱体のスケール、測定ポイント位置が異なっているため、参考までに図-1、図-2に示す。

2.1. 発熱体

今回は3m×3mの発熱体を技術研究所内の平坦な場

所に設置した。発熱体が9のユニットにより構成され、各ユニットの出力が2, 4, 5 kW/m²に制御出来る点以外は前報と同様のものである。

2.2. 温度測定

発熱体からの熱拡散を測定するために図-1、図-2に点線で示される格子に輻射除けをもつ熱電対を取り付けた(測定点数76)。発熱体表面温度の測定には熱電対シートを用いた(測定点数9)。大気安定度を知るため、地表0.25~1.0mの垂直温度分布を測定した(測定点数4)。以上の温度測定用89点の他、サーミスタ型風速計用1点、エプリ型日射計用1点、3杯型風速計用5点、計96点を1分間のスキャンでデジタル量として計測し、1回の実験につき連続10分間測定して、この平均値を用いた。

2.3. 風速測定

発熱体の中央部、高さ0.85 m に設置した温度補正付サーミスタ型風速計を用いて、温度測定直前及び直後に各5分間、1秒間隔に風速を記録した。これは拡散係数算出のためである。また風速の垂直分布を測定するために微風速用3杯型風速計を地表0.5~2.5 mの間に5台設置した。

2.4. 測定期間

以上の方法で1976年8月、ヒータ出力を2, 4, 5 kW/m²と変化させて測定を行った。測定回数は各21回、計63回である。

3. 実験結果

3.1. 実験結果に関する基礎的事項

3.1.1. 発熱量 模型表面から空気に対流として伝えられる熱量は前報と同様に、(1)式により求めた。

$$q_h = \alpha_1 \cdot I_r + \alpha_2 \cdot I_a - \alpha_3 \cdot C_d (273 + t_s)^4 + q_s \dots \dots (1)$$

(q_h : 対流として伝えられる熱量, I_a, I_r : 水平面大気輻射量及び日射量, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 日射吸収率, 大気輻射吸収率, 輻射率, C_d : 黒体輻射定数, t_s : 発熱体表面温度, q_s : 発熱体からの発生熱量)

(1)式により得られた全実験の計算結果を図-3に示す。図より2, 4, 5 kW/m²のヒータ出力に対し、模型表面から空気に対流として伝えられる平均熱量は各1.46, 3.24, 3.85 kW/m²と推定される。

3.1.2. 風速測定 図-4にサーミスタ型風速計と三杯型風速計の指示値の比較を10分間の平均値として示す。15%程度サーミスタ型風速計の方が大きい値を示しているものの、測定位置の違いもあり、模型周辺では大きな風速の相違はないと考えられる。図-5に三杯型風速計による風速プロファイルを示す。これらを大気安定度と結びつけて解析する事は困難であったが、ベキ乗法則で表わすと概略的にはN値が4の場合の風速プロファイルで近似出来ると言えよう。

3.1.3. H_m の定義と各測定値の時間変動 発熱体か

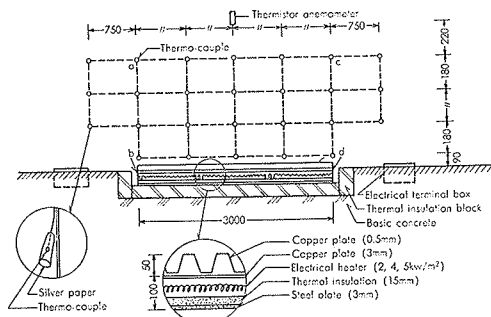


図-1 実験装置 (断面図)

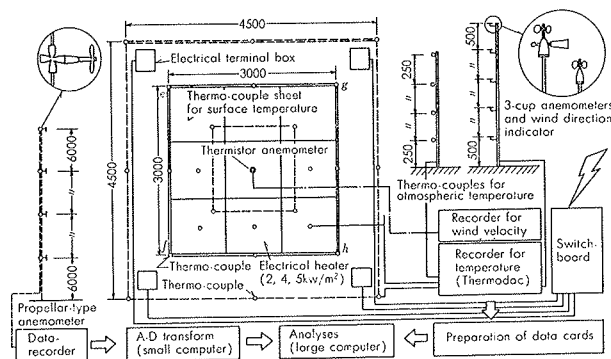


図-2 実験装置 (平面図)

らの熱拡散状態を巨視的に把握するために、次式で示される H_m を用いた。

$$H_m = \sum_{i=1}^n C_p \cdot r \cdot (t_i - t_a) \cdot V_i \dots \dots (2)$$

($\sum_{i=1}^n V_i$: 模型上 3 m × 3 m × 0.63 m の格子体積, C_p :

比熱, r : 比重, t_i : i 点の温度, t_a : 外気温度)

図-6に H_m と模型上部の高さ0.09 m と 0.63 m における5点平均温度との比較を示す。共に H_m に対して直線的な比例関係にあり、 H_m は模型上部の空気温度の指標と言える。 H_m , 風速, 表面温度の10分間の変動を図-7に示す。表面温度は銅板の熱容量もあるために変動は少ないが、 H_m は風速に反比例して変動している事がわかる。図-7から温度測定時間として10分間の平均値

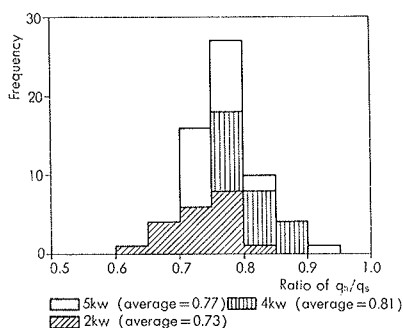


図-3 発熱体からの対流熱量比 (q_h/q_s) の度数分布

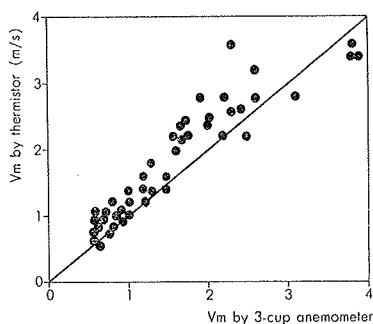


図-4 サーミスタ型風速計と三杯型風速計との風速データ比較

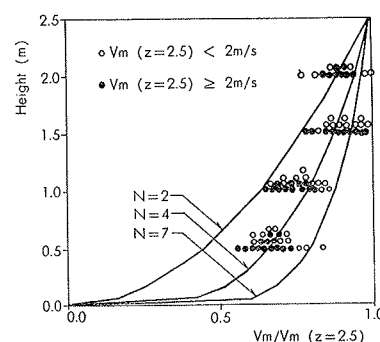


図-5 風速の垂直分布

を用いれば、その平均的な熱拡散状態を把握出来ると思われる。その場合、 H_m は $\pm 10 \sim 20\%$ の範囲で変動している。

3.2. H_m と表面温度及び風速との相関

図-8 に H_m と表面温度差 (Δt_s) の相関を風速別に示す。ヒータ出力は 2, 4, 5 kW/m² が含まれている。これによれば風速が一定であれば表面温度差と H_m は直線的な比例関係にあり、表面温度差が一定であれば、風速が増大する程 H_m は減少する事になる。図-9 はヒータ出力別に風速と H_m の相関を示したものである。2 kW/m² の場合、ばらつきがあるものの、4, 5 kW/m² ではほぼ風速と H_m は反比例の関係にあると言えよう。図-10 に $H_m/\Delta t_s$ と風速との相関を示す。 $H_m/\Delta t_s$ の値は風速の増大と共に減少し、2 m/s 以上では一定値に達する。これらの値にヒータ出力の差は現れていない。これは風速 2 m/s 以下では模型表面における表面熱伝達率は風速に正比例しておらず、低風速時でもある程度の表面熱伝達率が確保されており、風速 2 m/s 以上では表面熱伝達率は風速に概略正比例してくるためと思われる。

3.3. 水平方向の拡散係数 (D_m)

3.3.1. 算出方法 水平方向の拡散係数の算出はサーミスタ型風速計の 1 秒間隔のデータを用いて、次式により算出した。

$$D_m = \overline{u'^2} \int_0^{T_1} R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(3)$$

(T_1 : $R(\tau)$ (自己相関関数) が始めて 0 になるまでの時間, u' : V_m (水平方向風速の測定値) の変動)

(3)式で拡散係数を算出した結果、前報で指摘した定常エルゴート過程からはずれたものが、全測定中35%をしめている。しかし、このような例を除けば、本実験の場合拡散係数を 5 分間の風速データから算出して差しつかえないと思われる¹⁾。

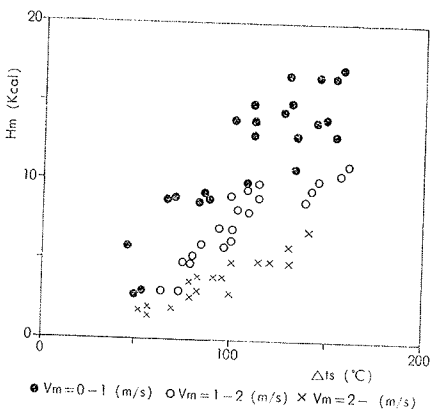


図-8 Δt_s と H_m との相関

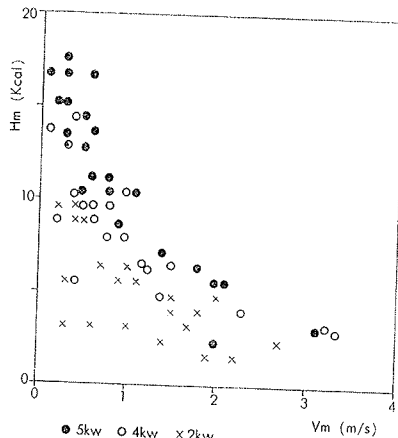


図-9 V_m と H_m との相関

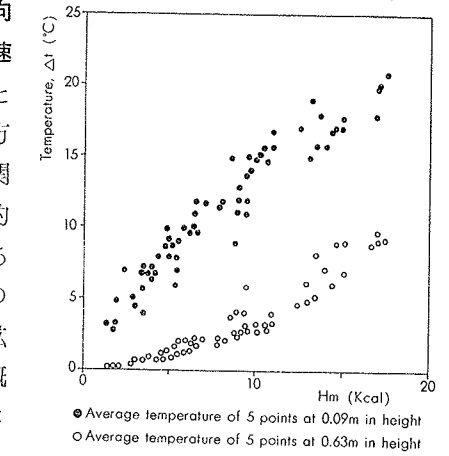


図-6 H_m と Δt (0.09 m と 0.63 m) との相関

3.3.2. 水平方向の拡散係数と風速

図-11 は風速と算出された水平方向の拡散係数の関係である。直線的な比例関係にあり、地上 0.85 m の高さでは風速と拡散係数の関係は概略的に次式で示される。

$$D_m = 1.0 \cdot V_m \quad \dots\dots\dots(4)$$

図-11 では 30 秒ごとの平均風速が、5 分間の平均風速に対し、 $\pm 40\%$ 以内に納まっているものを使用した。

3.3.3. 水平方向拡散係数の垂直分布

拡散係数の垂直分布を知るために地上 0.5, 0.75, 1.0 m にサーミスタ型風速計 3 本を設置し、同時に 5 分間 1 秒間隔に風速を測定し、拡散係数を算出した。これに對

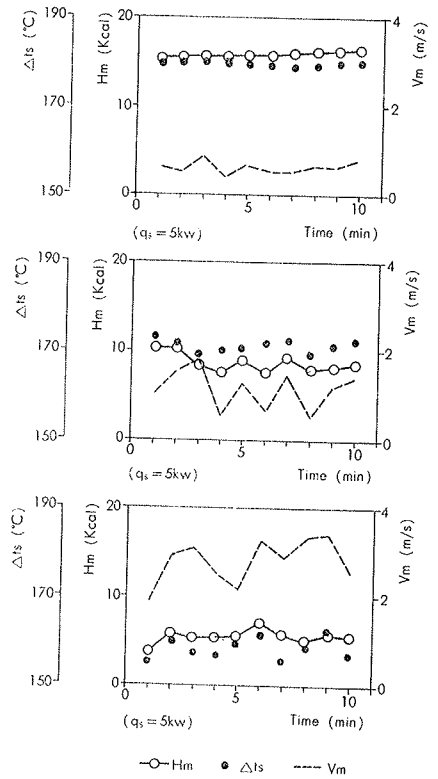


図-7 H_m , Δt_s , V_m の時間変動 (1 分間隔)

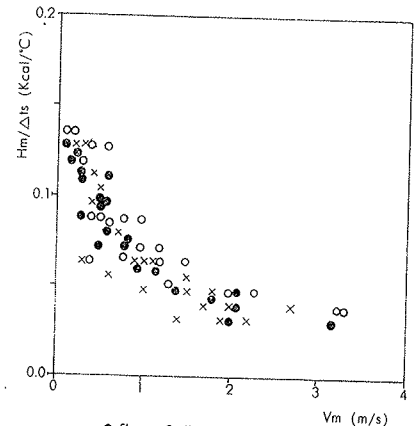


図-10 V_m と $H_m/\Delta t_s$ との相関

する回帰直線を、 $D_{m0}=a_0 \cdot Z$ とすると、図-12は各高さでの測定値 D_m を D_{m0} で除した無次元の拡散係数の垂直分布である。これによると水平方向の拡散係数は概略的に高さに正比例して増大していると言えよう。

3.4. 垂直方向の拡散係数 (D_z)

3.4.1. 算出方法 垂直方向の拡散係数は、各温度測定点において次式の様にした差分式を当てはめ算出した。

$$D_{m \cdot h} (t_{i+1,j,h} + t_{i-1,j,h} + t_{i,j+1,h} + t_{i,j-1,h} - 4 \cdot t_{i,j,h}) / \Delta x^2 + \{D_{z,h+1}(t_{i,j,h+1} - t_{i,j,h}) + D_{z,h-1}(t_{i,j,h-1} - t_{i,j,h})\} / \Delta z^2 - \{u_h(t_{i+1,j,h} - t_{i-1,j,h}) + v_h(t_{i,j+1,h} - t_{i,j-1,h})\} / \Delta x + q_{i,j,h} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

($\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 差分方程式における空間の分割長さ)

各測定値と隣接する測定点の温度を用いて、各高さにおいて発熱体中央5点で計算し、平均操作を加え、 D_z を導いたものである。 D_z, D_m は高さ方向の関数としているが、水平方向には均一と仮定した。

3.4.2. 垂直方向の拡散係数と風速 この様にして求められた拡散係数と風速との関係を図-13に示す。これは高さ 0.54 m のもので、概略的には D_z と風速との間には次式の関係があると言えよう。

$$D_z \approx 0.1 \cdot V_m \quad \dots\dots\dots(6)$$

図中、ばらつきの大きい 2 kW/m^2 のケースは省いて

ある。

3.4.3. 垂直方向拡散係数の垂直分布 垂直方向の拡散係数は高さ 0.18, 0.36, 0.54 m で算出される事になる。図-14は高さ 0.54 m の拡散係数を 1 とした場合の垂直分布を、地表 0.85 m の風速を用いて、風速別に平均値として示したものであり、風速 1 m/s 前後を境に D_z の垂直分布が異ってくる事がわかる。垂直分布を(8)式で近似した場合の n 値と地表 0.85 m の風速の関係を図-15に示す。これらの関係から概略的には D_z の分布型は次式のように表現出来る。

$$D_z = a_0 \cdot z \quad (1.2 \leq V_m \leq 2.5) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$D_z = a_0 \cdot z^n \quad (0.5 \leq V_m < 1.2) \quad \dots\dots\dots(8)$$

n の値は風速の減少と共に小さくなる。図-16は風速 1.2 m/s 以上の場合の D_z の分布を示したものであり、地表高さに正比例して増大している。

また今回の実験では、風速分布や拡散係数に対する大気安定度の影響を見い出すことはできなかった。

4. 温度分布

実験結果、計算結果共に確率分布モデル²⁾を用いて、等温線図を作図した。また理論計算は既報の計算法³⁾に改良を加えたものである。

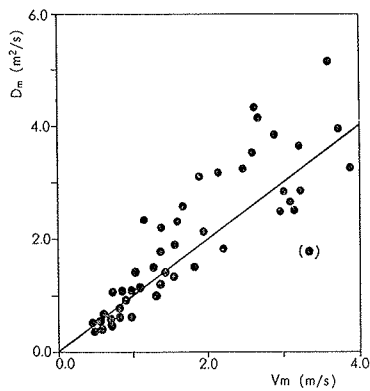


図-11 水平方向の拡散係数と風速との相関

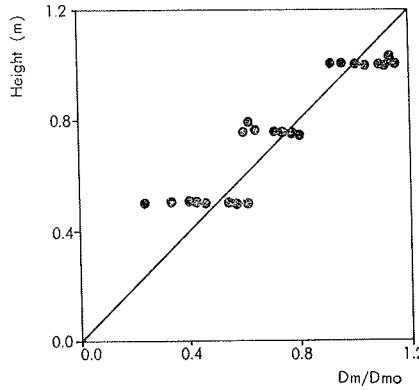


図-12 水平方向拡散係数の垂直分布

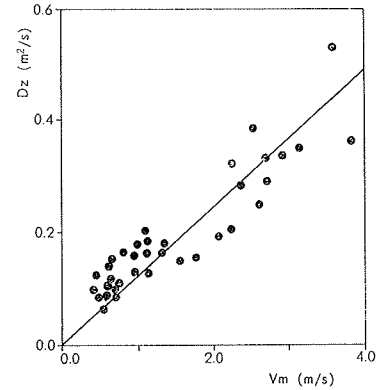


図-13 垂直方向の拡散係数と風速との相関

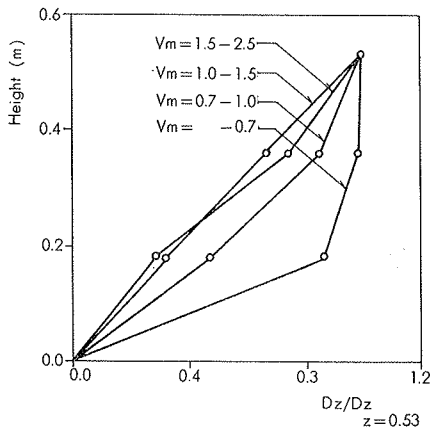


図-14 垂直方向拡散係数の垂直分布 (風速別)

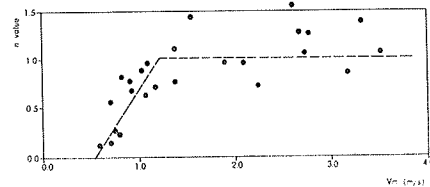


図-15 n 値と V_m との相関

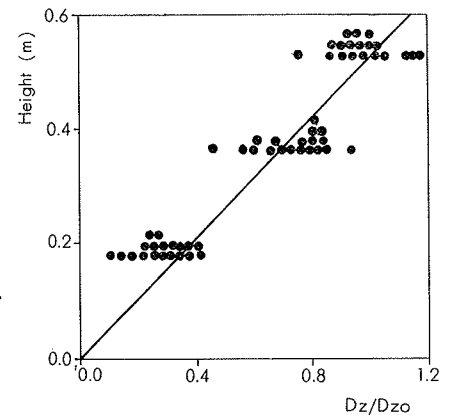


図-16 垂直方向拡散係数の垂直分布 ($V_m > 1.2 \text{ m/s}$)

4.1. 実測温度分布の時間変動

10分間内の温度分布の時間変動を検討したが、比較的小さかった。また表面温度、断面温度分布図はそれ程変動していないが、平面温度分布図の変化が大きい事が認められた。

4.2. 実験値と計算値の比較

発熱量や風速の異なる2例を図-17、図-18に示す。

4.2.1. 数値計算における各係数 風速は高さ0.85mにおけるサーミスタ型風速計による値を用い、風速分布は図-5から1/4乗法則と設定した。水平方向の拡散係数は高さに正比例とし、 $D_x=D_y$ と仮定して、(4)式を用いた。高さ方向の拡散係数については(7)、(8)式を用い、n値は図-15に点線で示されている値を用いた。但しここでは実験値と計算値の最高温度がほぼ等しくなるように試行錯誤で選定した。

4.2.2. 水平温度分布図の比較 水平温度分布図の中で、高さ0.09mのものについて、実験値と計算値を比較すると、特に風速の弱い場合に風上側の温度は計算値の方が高くなる傾向がある。高さ0.27mにおける比較では高さ0.09mのものより整合性はよい。

4.2.3. 断面温度分布比較 地表付近の風上側では計算値の方が高くなっているものが多いが、全体としては平面温度分布図より整合性は良好である。

4.2.4. 実験値と計算値の相関 実験値と計算値の相関を図中に示した。計算を行った5例については相関係数0.88~0.98の範囲で一致しており、平均相関係数は

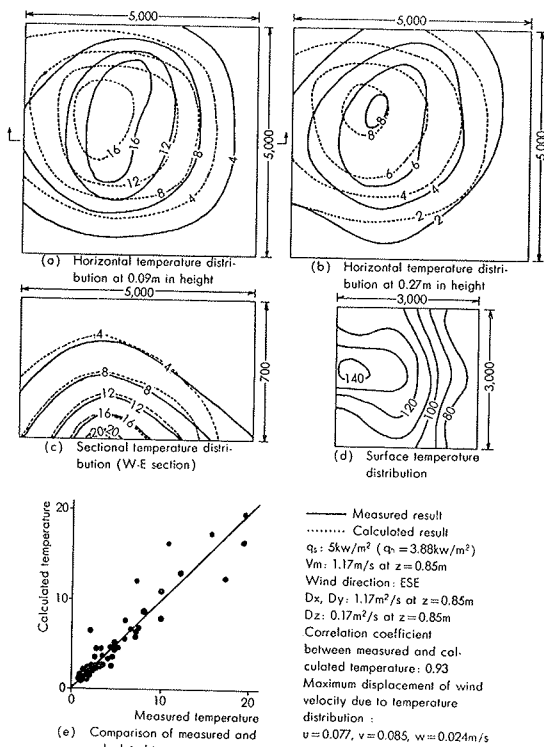


図-17 実験値と計算値との温度分布比較(その1)

0.93である。また風速が弱い場合相関係数が低くなる傾向がある。これは等温線の照合からも言える。

4.2.5. 自然対流による影響 自然対流による上昇気流の影響は、図-17、18に最大風速変位を示している。本実験では拡散係数が風速に比べて大きいという事から、数値計算上からも際立った影響は現れていない。温度分布図の照合から、自然対流の影響を考慮した方が整合性はよくなるものの、その差は非常に小さい。

5. まとめ

本実験により、温度分布の巨視的指標である H_m 、 H_m/At_s と風速との関係、水平方向・垂直方向の拡散係数の垂直分布と風速との関係が得られた。これらの結果を用いた理論計算値と実験値を温度分布で比較したところ、相関係数0.88~0.98で一致した。また自然対流の影響は、比較的小さいことがわかった。

今後は本実験で得られた結果の実物への適用の可能性が問題となる。

参考文献

- 1) 岡建雄, 他: 都市における熱的環境に関する研究(その4), 大林組技術研究所報, No.14, (1977)
- 2) 尾島, 他: 都市規模熱拡散に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和47)
- 3) 尾島, 他: 市街化空間の熱的環境に関する研究, 日本建築学会論文報告集, (昭和51. 2)

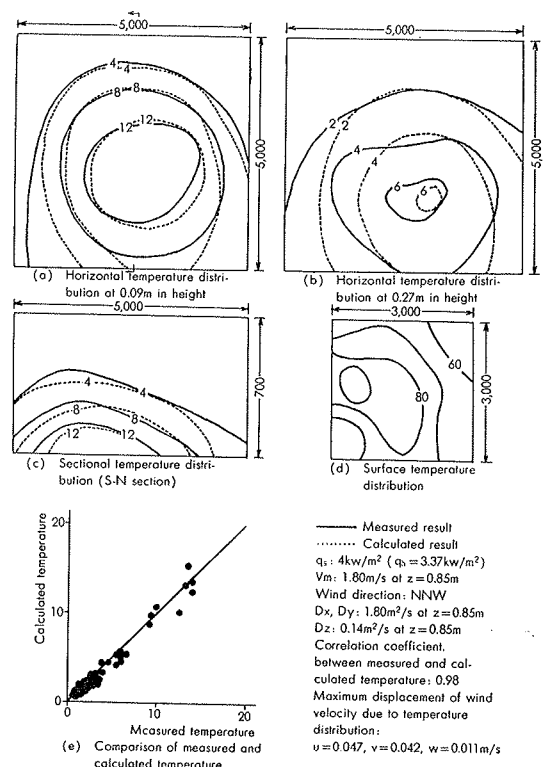


図-18 実験値と計算値との温度分布比較(その2)