

市街地における熱環境予測手法（その1）

——ヒートアイランドに関する風洞模型実験——

赤川 宏幸 小宮 英孝
宮川 保之

Method for Predicting an Urban Thermal Environment (Part 1)

——Model Experiment in a Wind Tunnel for an Urban Heat Island——

Hiroyuki Akagawa Hidetaka Komiya
Yasuyuki Miyagawa

Abstract

Since many factors affect the urban thermal environment, no reliable numerical model has yet been established for it. In addition, reappearance of the urban thermal condition is so difficult in terms of its scale that there have been few model experiments. The aim of this study is to predict the urban thermal environment by numerical simulation and to arrange greenery and bodies of water at the most suitable positions in an urban area.

This paper reports the model experiments using a wind tunnel for the urban heat island. The main outcomes are as follows: ① The features of wind, e.g., mean velocity and turbulence intensity, were examined. ② The distributions of air temperature above the heated urban model were measured under a neutral and stable condition. ③ Sensible heat fluxes in the actual urban area were estimated by the use of similarity law. ④ The distributions of air temperature calculated by the $k-\epsilon$ turbulence model showed good agreement with measurement data.

概 要

都市内外の熱環境をシミュレートする際には、影響を及ぼすパラメータが多く、十分信頼できるモデルは確立されていない。また、模型実験によって都市の熱環境を再現することはスケールの点から難しく、従来あまり行われていない。本研究では、都市の熱環境を数値計算により予測し、緑地、水域等の最適配置計画に適用していくことを目的としている。

今回は、都市を模擬した模型を風洞内に設置し、基本的な気流性状を把握するとともに、模型を加熱して気流温度分布の測定を行った。この際、風洞内気流分布が中立の場合に加え、ドライアイス（ドライアイス）を風洞上流側の床面に敷き詰め、安定気流分布のもとでも行った。またアルキメデス数、発熱量の相似により実都市の顕熱流を予測し、その値が都市で測定される値にほぼ合致していることを示した。 $k-\epsilon$ モデルによる気流温度分布の計算結果も実験値と良好な一致を示した。

1. はじめに

都市部においては、人工排熱量の増加、コンクリートやアスファルトに覆われることによる蓄熱量の増加、緑地や裸地の減少による水分蒸発量の低下などにより、郊外に比べて気温が高くなるヒートアイランド現象が見られる。このような都市内外における熱環境をシミュレートする際には、上述のように影響を及ぼすパラメータが多く、十分信頼できるモデルは確立されていない。また、

模型実験によって都市の熱環境を再現することはスケールの点から難しく、従来あまり行われていない。

本報では、風洞内に設置した都市模型を用い、乱れ、拡散係数等を測定した結果と、中立、および安定気流のもとで都市模型を加熱し、気流の温度分布を測定した結果を報告する。また相似則によるヒートアイランドの予測、 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる気流温度分布の計算結果との比較についても併せて報告する。

2. 実験方法

2.1 装置概要

2.1.1 風洞装置 使用する風洞は当社技術研究所環境研究センター内にある回流式密閉型風洞実験装置であり、今回はトラバース装置の付随する第一測定洞を使用した。この風洞制御システムではファンやトラバース装置を制御するとともに、センサーからの出力をA/D変換器（256 ch, 最高1,000 KHz サンプリング, サンシステム）でデジタル量に変換してEWS（HP 9,000）に転送することができる。

2.1.2 都市模型 都市の熱環境を模擬するため、風洞内に付随のターンテーブル上に1m×1mの発熱体を設置した。これを図-1に示す。この発熱体は厚さ5mmの銅板の下部にハイレックス遠赤外線ヒーター（HS 1,212, 200 V, 1.25 kW, 八光）5本を設置し、その側部、下部を厚さ3.2mmの鉄板、アスベスト、グラスウールで覆ったものである。銅板の上面は風洞床面と同レベルとしてあり、また銅板上には厚さ0.5mmの銅板を折って作成した二次元粗度（高さ30mm, 幅30mmの矩形）が設置してある。

2.2 風速測定

2.2.1 風速計 風速の測定には熱線流速計（ダンテック）を用いた。この熱線流速計は、X型流速センサー（55P51）、温度補償センサー（55TC6）、アンプ（56C12）、リニアライザー（56N21）により構成される。

流速センサーはトラバース装置のアーム部にサポートバーを用いて水平に固定され、各位置での自動計測を可能とした。また温度補償センサーをトラバース装置に固定した。

2.2.2 較正 実験時に用いる風速は0.2～2.0 m/sと小さいため、風洞の自動設定は用いず、マニュアル操作でファンの回転数を調整した。基準風速としては、定温度型サーミスタ風速計（芝浦電子）を模型中心から上流側2.4 m, 風洞中心から1.0 m, 風洞床面から1.0 mの高さに設置し測定した。また、流速センサーは風速増加に対して非線形な出力を与える。そこで、風速とリニアライザーの関係を専用プログラムを用いてテーブル化し、内挿補間により風速を求めた。

2.2.3 測定 風速の測定位置を図-2に示す。また、測定にあたり風洞床面に特別な粗度は配置しなかった。測定周波数は100 Hz, 計測時間は30 secである。実験で用いた設定風速は0.2, 0.6, 1.0, 2.0 m/sであるが、回転数によるマニュアル設定のため、これらの風速に正確には合致していない（実際は0.23, 0.56, 1.06, 2.14 m/s）。

今回の目的である模型加熱時の気流性状は、気流の温度差がかなり大きいため熱線風速計の温度補償センサーが追従できず、また流速センサー近傍の温度瞬間値を風速センサーと同じ周波数で得るための技術も確立されてないため、直接加熱状態での測定は行わなかった。そこで、今回は発熱なしの状態での模型上の気流性状を把握

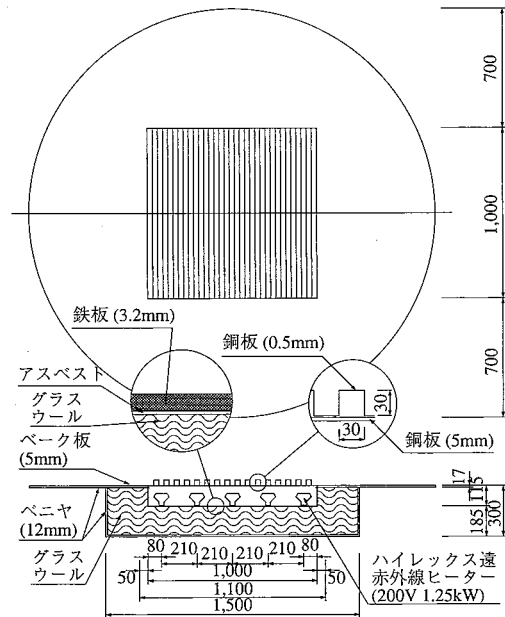


図-1 都市模型

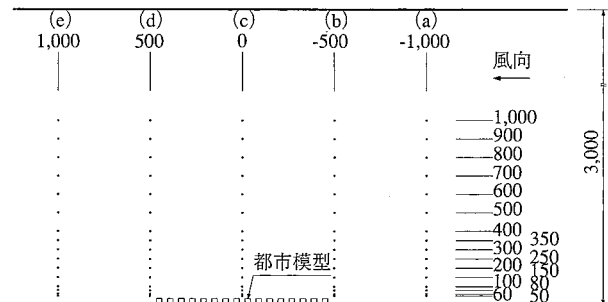


図-2 風速測定ポイント（模型中心線上 y=0）

した。

2.2.4 解析 得られた風速データを基に以下の諸量を1 secの評価時間（100データ）で算出した。

$$(a) \text{平均風速} = \bar{u} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$(b) \text{乱れ強さ} = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_{\infty} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$(c) \text{レイノルズ応力} = -\overline{u'w'} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$(d) \text{Prandtl の混合距離} \quad l_z = \sqrt{-\overline{u'w'}} / \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$(e) \text{鉛直方向の拡散係数} \quad D_z = -\overline{u'w'} / \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$(f) \text{水平方向の拡散係数} \quad D_x = \overline{u'^2} \int_0^{T_1} R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(6)$$

2.3 温度測定

アルミ製のフレーム枠に細い針金を張り、y 方向5点（中心から y=0, 150, 300, 450, 600 mm）、z 方向9点（z=50～1,000 mm）に極細熱電対（T-タイプ, φ0.1 mm）を取り付け、一断面を同時に測定できるようにし

た。x 方向に関しては11点 ($x = -1,000 \sim 2,500$ mm) で測定を行った。

測定はヒーター発熱量 1, 2, 3 kW, 設定風速 0.2, 0.6, 1.0, 2.0 m/s で行われた。データは 5 sec 間隔でデータロガー（サーモダック E 200, 江藤電気）に取り込まれ、各ポイントで1分間の平均値として評価した。

3. 実験結果

3.1 気流性状

上述のように、ここで示される結果はヒーター発熱量を 0kW とした時のものであり、図-2 で示された測定ポイントのうち、測定点(a), (c), (d), (e)での各量の鉛直分布である。測定点(a)は都市模型の上流側, (c)は模型中央, (e)は下流側にあたる。

まず、図-3 は上流側(a)と模型中央(c)の平均風速の鉛直分布を示す。粗度を配置していない上流の測定点(a)では、粗度定数約 0.0015 m とした場合の対数分布にほぼ一致している。境界層厚は $U_\infty = 1.06$ m/s 以下では約 600 mm, $U_\infty = 2.14$ m/s の場合約 400 mm となっている。た

だ $U_\infty = 0.56$ m/s の時はばらつきが見られ、繰返し 3 回測定を行ったが、 $U_\infty = 0.6$ m/s 付近では常にこのようなばらつきが見られた。おそらく風洞の設定風速が小さかったために気流が安定しなかったようである。

模型中央の測定点(c)では高さ 30 mm の矩形粗度の影響で、粗度定数 0.01~0.015 m とした場合の対数分布に

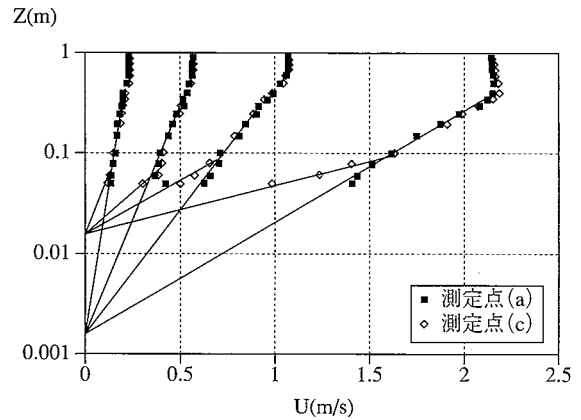


図-3 平均風速の鉛直分布

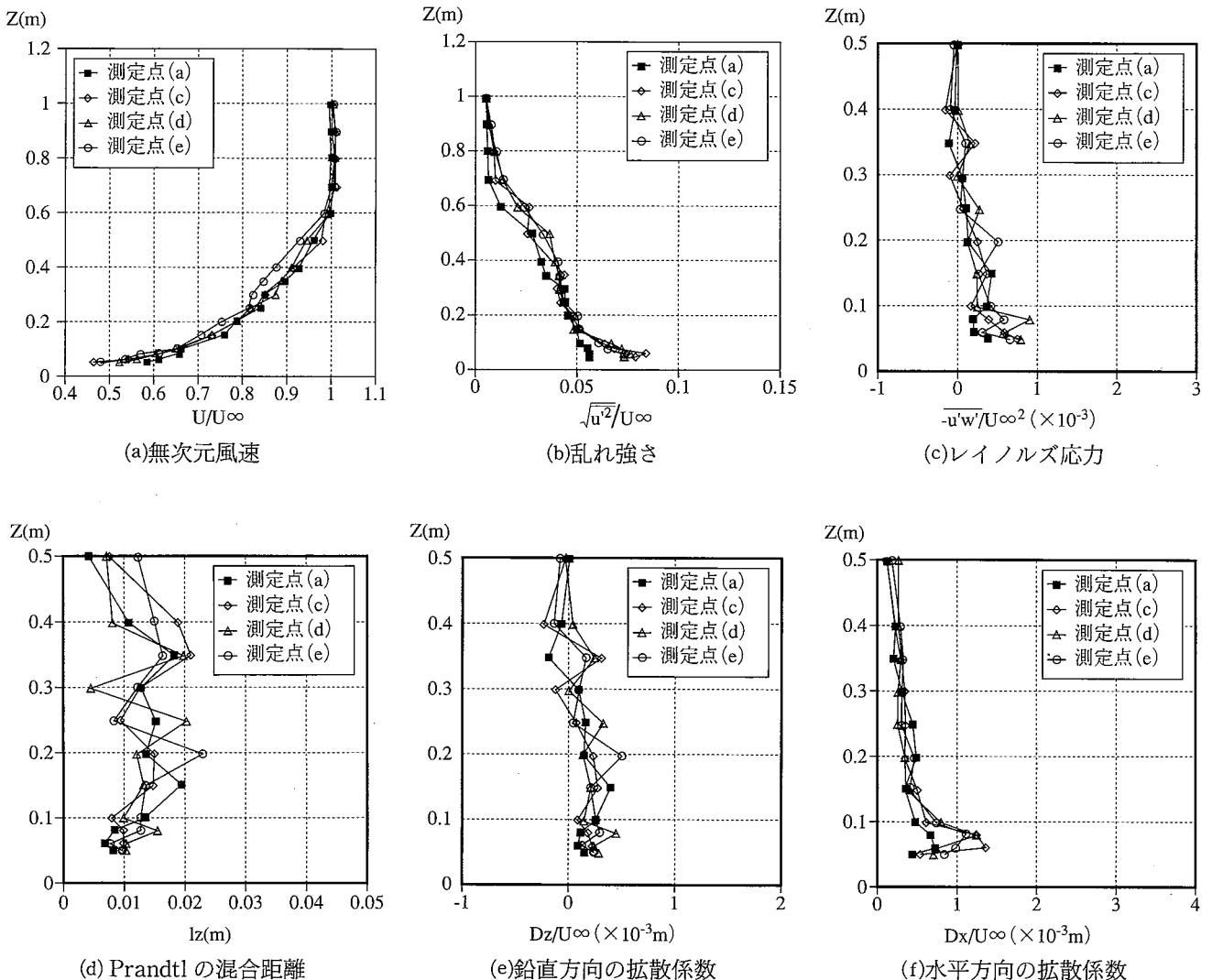


図-4 風速 1 m/s 時の気流性状

一致しており、内部境界層が約 100 mm まで発達している。

図-4(a)に $U_{\infty}=1.06$ m/s 時の風洞風速 U_{∞} で無次元化した風速の鉛直分布を示す。模型上および下流では最下層 ($z=50$ mm) の風速が上流より小さくなっており、模型中央で最も風速が小さい。以下図-4(b)~(f)では $U_{\infty}=1.06$ m/s 時の場合のみを紹介する。

図-4(b)に乱れ強さの鉛直分布を示す。乱れ強さは上方へ行くほど減少し、境界層より上部では0に近付き一定となる。境界層内での大きさは、 U_{∞} の増加とともに大きくなる。また模型上および下流では $z=150$ mm 以下で大幅に乱れ強さが増大している。

図-4(c)に U_{∞} で無次元化したレイノルズ応力の鉛直分布を示す。ばらつきは大きい、模型上および下流では下層部で増加している。

図-4(d)に Prandtl の混合距離の鉛直分布を示す。上流側のグラフに次式のような比例直線のある高さまで引いてみると、混合距離の高さに対する傾きは $k'=0.13$ 程度となり、 U_{∞} が大きいほど大きくなる傾向にある。

$$l_z = k'z \quad \dots\dots\dots(7)$$

k' は自然風中では0.35~0.41（カルマン定数）となるが、粗度のある風洞中では0.1~0.2と小さい値となることが知られている。模型上および下流でもほぼ同様の結果が得られたが、 $U_{\infty}=2.14$ m/s 以外はばらつきが大きくなっている。

図-4(e)に鉛直方向の拡散係数を U_{∞} で割った形の鉛直分布で示す。 U_{∞} が大きいほど値が大きくなっている。また下層からある高さまでは増加し、その上方は減少している。さらに模型上および下流では、内部境界層内にもう一つピークが見られる。

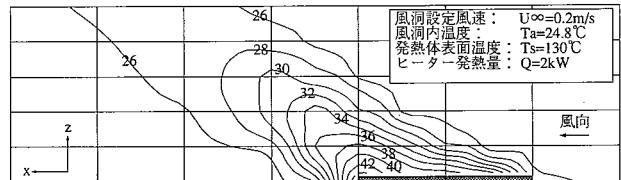
図-4(f)に水平方向の拡散係数を U_{∞} で割った形の鉛直分布で示す。全ての U_{∞} の場合において下層ほど大きく、上方へ漸減している。また U_{∞} が大きいほど値が大きくなっており、さらに模型上および下流では $z=50\sim100$ mm の範囲で上流の2倍程度となっている。鉛直方向の拡散係数と比べると、分布形は異なっているがオーダーとしては数倍の値となっている。

3.2 温度分布

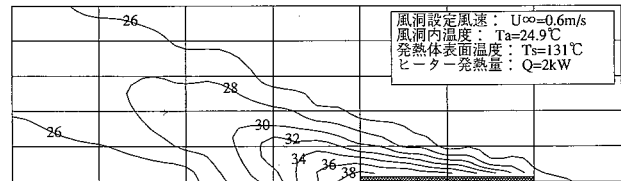
3.2.1 流入気流が中立の時 図-5(a)~(d)に風洞風速を0.2, 0.6, 1.0, 2.0 m/s, ヒーター発熱量を2 kW とした場合の気流温度分布を示す。断面は模型中央を通る $y=0$ mm のレイヤーである。図中の発熱体表面温度とは模型中央部の値であり、周辺部では上流側で若干低め、下流側で高めとなっている。

気流温度は発熱量が大きいほど高く、風速が小さいほど下流での上方拡散が大きい。風速が大きくなると床面を這うような温度分布となり、上方への拡散が押さえられている。下流における温度中心は、模型の下流側縁部から下流上方へと伸びている。

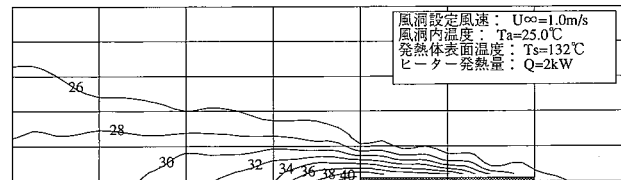
3.2.2 流入気流が安定成層の時 都市模型上の流入気流として夜間の逆転層のような安定気流分布を模擬す



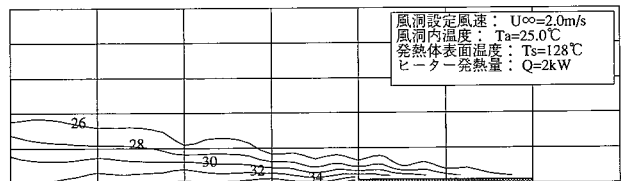
(a)風速 0.2 m/s (描画範囲 $x = -1,000\sim2,500$, $y = 0$, $z = 0\sim1,000$ mm)



(b)風速 0.6 m/s



(c)風速 1.0 m/s



(d)風速 2.0 m/s

図-5 流入気流が中立時の温度分布 ($Q=2$ kW)

るため、模型の上流側2 m~7 m ($x=-2,500\sim-7,500$ mm) の位置に $250\times250\times20$ mm の板状ドライアイス240枚 (約480 kg) を風洞の幅一杯に敷き詰めた。

図-6は $U_{\infty}=0.6$ m/s で発熱量0 kW の時の気流温度分布を示す。模型上で温度が低下しているが、これは銅板が冷やされその影響が気流に及んでいるためである。全体的に厚さ約200 mm の安定層ができていことが分かる。

図-7は図-6と同じ条件でヒーター発熱量が2 kW の時で、それぞれ $U_{\infty}=0.6, 1.0$ m/s の場合である。ただし、コンターの値は風洞内温度 T_a との差を取っている。強い安定状態にあった上流側の気流が都市模型上で加熱され、混合層が形成されている。また、下流での上方拡散は中立時に比べ弱くなっている。

4. 相似則によるヒートアイランドの予測

実験に用いた都市模型を実際のスケールの仮想都市と考えた時に、都市内外の温度差、風速、熱流をアルキメ

デス数，発熱量の相似によって予測する。

$$Ar = \frac{g\beta T_0 L_0}{U_0^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{Q_0}{U_0 T_0} = 1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

q_0 は都市模型の表面発熱量から次式で計算される。

$$H = 3,600\rho C_p q_0 = (0.86Q - Q_e)/A_s - R_e \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$R_e = \varepsilon_1 \varepsilon_2 (4.88 \times 10^{-8}) \{ (T_s + 273)^4 - (T_c + 273)^4 \} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_e = A_b (T_s - T_b) K \quad \dots\dots\dots(12)$$

熱流が最も大きかった 3 kW, 0.2 m/s のケースを用いて，相似則による予測を行った。この時，風洞内においては $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ($z = 50\text{ mm}$ における風上と都市模型上との温度差) を用いた。結果を表-1 に示す。

ケース(1)の場合，1,000 m 四方の都市，風速 1.0 m/s と仮定すると，都市内外の温度差 1.0°C ，熱流が 218 W/m^2 になると予測される。ケース(2)の場合，1,500 m 四方の都市，都市内外の温度差 1.0°C と仮定すると，風速 1.2 m/s，熱流が 261 W/m^2 になると予測される。ケース(3)の場合，風速 0.8 m/s，熱流が 100 W/m^2 と仮定すると，1,070 m 四方の都市，都市内外の温度差 0.6°C になると予測される。これらのオーダーは野外で測定される値とよく一致している。

5. 気流温度分布の数値計算との比較

風洞実験により得られた気流温度分布が数値計算により再現できることを確認した。解析対象は y - z 断面は風洞と同様に $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ とした。 x 方向に関しては，風速の鉛直プロファイルを実測値と合致させるために，都市模型上流側 45 m を吹送区間とし，壁面には対数則を与えて境界層を発達させた。また，都市模型上では適当な粗度を与え，模型中央での内部境界層の発達状況を実測値に合わせた。模型の発熱については，表面温度の実測値を平均し，一様に与えた。この時の対流熱伝達率は $4.6\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とした。メッシュ分割については $41 \times 19 \times 26$ とし，模型上ではメッシュ幅を 14 cm とした。

基礎方程式の離散化には，移流項について 3 次精度の QUICK 法¹⁾，拡散項には中心差分法を用いて SIMPLE 法²⁾による非定常解析を行った。乱流補正には標準 k - ε モデル³⁾を用いた。

図-8(a), (b)はヒーター発熱量 2 kW，風洞風速がそれぞれ 0.2, 0.6 m/s の場合の比較である。どちらの場合も鉛直断面では，下流側での上昇流が良く一致しているが，水平断面($z = 200\text{ mm}$)では，実測値に偏心が見られるため， y 方向にずれが見られる。しかし，温度差が 100°C 程度あるにもかかわらず，このような一致が見られたことは， k - ε モデルによるヒートアイランドのシミュレーションが可能であることを示している。

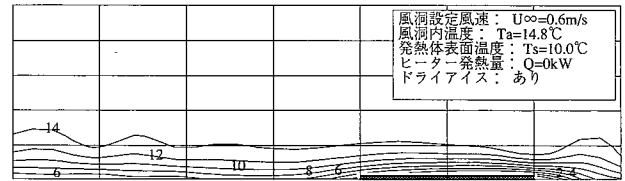
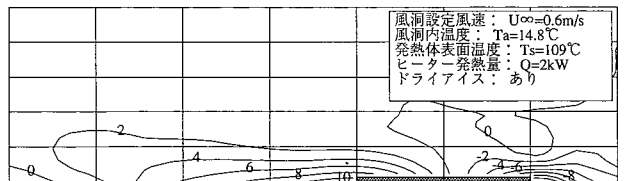


図-6 流入気流が安定時の温度分布 ($Q = 0\text{ kW}$)



風速 0.6 m/s (数値は風洞内温度 T_a との差を示す)

図-7 流入気流が安定時の温度分布 ($Q = 2\text{ kW}$)

表-1 相似則による予測

	L_0 (m)	U_0 (m/s)	T_0 ($^\circ\text{C}$)	H (W/m^2)
模型	1	0.2	40	1,740
ケース (1)	1,000	1.0	1.0	218
ケース (2)	1,500	1.2	1.0	261
ケース (3)	1,070	0.8	0.6	100

斜体は仮定値を表わす。

6. 可視化

図-9に $Q = 2\text{ kW}$, $U_\infty = 0.2\text{ m/s}$ 時の気流温度の様子をサーモカメラ (サーモビュー JTG-5,700, 日本電子) で捉えたものを示す。この時上流側にドライアイスは設置していない。方法としては，20 mm 厚の発泡スチロール板をトラバース装置アーム部に固定し，模型中心線を通るよう若干浮かして設置した。発泡スチロール板は熱伝導率が小さいために，その表面温度は気流温度に敏感に追従できる。

発泡スチロールを設置したことによる気流の乱れは考えられるものの，各風速とも熱電対で計測した温度分布にほぼ対応している。

7. まとめ

ヒートアイランドに関する模型実験として，風洞内に設置した都市模型を用い，まず気流性状の測定を行った。設定風速が $0.2 \sim 2.0\text{ m/s}$ と小さかったが，各速度分布に対応する良好な乱れ，拡散係数等が得られた。また，中立，および安定状態のもと，この模型を加熱し気流の温度分布を測定した。相似則により実都市の熱流，ヒートアイランド強度等を予測したところ，現実の値と近いことが示された。気流温度分布を k - ε モデルによる計算

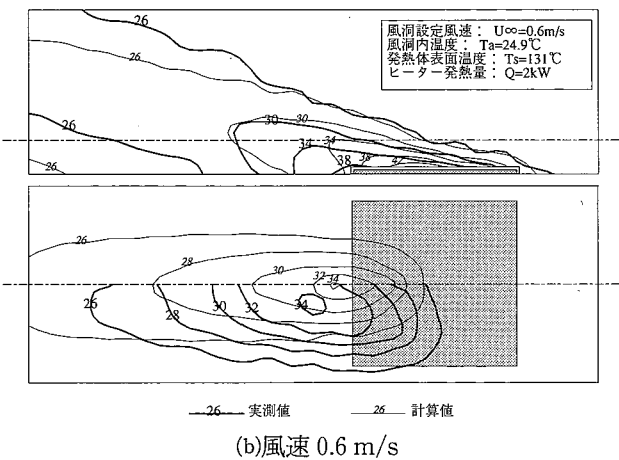
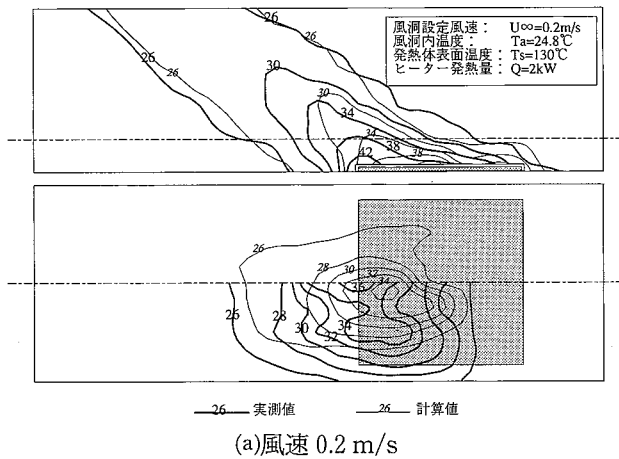


図-8 気流温度の実測値と計算値の比較 (Q=2 kW)

結果と比較したところ、良好な一致が見られ、このようなヒートアイランドの風洞実験が計算によって再現可能であることが示された。

記号

- A_b : 発熱体を囲むベニヤの表面積 (4.05 m²)
 A_r : アルキメデス数
 A_s : 都市模型の投影面積 (1 m²)
 C_p : 空気の比熱 (kcal/kg°C)

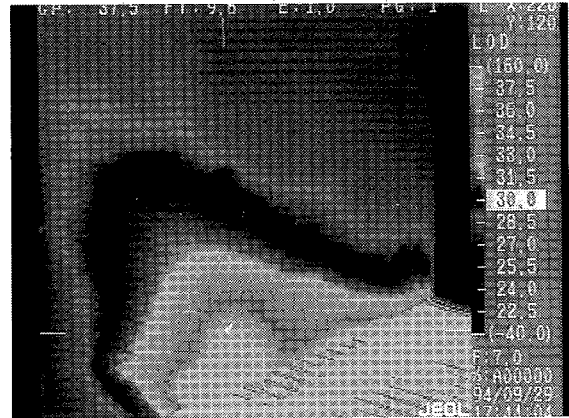


図-9 サーモカメラによる熱流の可視化 (Q=2 kW)

- g : 重力加速度 (m/s²) H : 表面発熱量 (kcal/m²h)
 K : 熱貫流率 (0.186 kcal/m²h°C)
 L_0 : 長さの基準量 (m) Q : ヒーター発熱量 (W)
 q_0 : 発熱に関する項 (m°C/s)
 $R(\tau)$: 自己相関関数 T_0 : 温度の基準量 (°C)
 T_1 : $R(\tau)$ が初めて0になるまでの時間 (s)
 T_b : 模型下面温度 (°C) T_c : 風洞天井面温度 (°C)
 T_s : 模型表面温度 (°C) U_0 : 速度の基準量 (m/s)
 u' : x 方向の変動風速 (m/s)
 w' : z 方向の変動風速 (m/s) β : 体膨張率 (1/°C)
 ε_1 : 銅の輻射率 (0.6) ε_2 : 風洞壁面の輻射率 (0.9)
 ρ : 空気密度 (kg/m³)

参考文献

- 1) Leonard, B. P.: The QUICK Algorithm: A Uniformity Third-Order Finite-Difference Method for Convective Flows, Computer Method in Fluids, Pentech Press, (1980)
- 2) Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, (1980)
- 3) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London and New York, (1972)