

都市における熱的環境に関する研究 (その7)

——小都市の熱的環境実測——

岡 建 雄

Research on Thermal Environments in Urban Areas (Part 7)

——Field and Numerical Studies of the Heat Island Effect in a Small City——

Tatsuo Oka

Abstract

Results of observations of the heat island effect in a small city and comparisons of observed and calculated temperatures are described. Horizontal and vertical temperatures were measured with automobile-mounted thermocouples and a wired balloon. According to the observed results, lapse rates in urban areas are almost neutral compared with those in rural areas and the heat island intensities are approximately proportional to lapse rates in rural areas. Calculated temperature distributions by the numerical method described previously are in fairly good agreement with observed results in comparisons of horizontal and vertical isotherms, by which the basic thermal structure of the urban heat island is clarified.

概 要

小都市におけるヒートアイランド現象を観測し、理論計算値と測定値を比較照合したものである。自動車観測及び気球観測により、水平、垂直温度分布を測定した。観測結果によると市外の安定大気に比較して、市内の垂直温度勾配は中立に近く、ヒートアイランド強度は市外の気温減率と概ね比例関係にある。温度分布に関して数値計算による結果と測定値を比較すると水平、垂直温度共に概ね良好な一致が見られ、ヒートアイランド現象の基本的メカニズムに関する一応の結論が得られた。

1. はじめに

建築群が都市大気に与える熱的影響としてヒートアイランド現象がある。本報告はスウェーデンの小都市 Lund におけるヒートアイランドの測定結果及び温度分布に関する測定値と計算値の照合結果である。水平面温度分布に関しては自動車観測により測定し、市内外の垂直温度分布は気球により測定した。

ヒートアイランド強度に関して市内外の垂直温度勾配が支配的な働きを考えると、水平及び垂直温度勾配を合せて考慮し、Summers のモデルによるヒートアイランド強度の計算値と測定値を比較した。また温度分布に関して拡散方程式に基く数値計算と測定値を比較した。計算値と測定値の比較照合によってヒートアイランド現象の基本的メカニズムに関する一応の結論が得られたので報告するものである。

—記 号—

- C_p : 比熱 ($Wh/^\circ C kg$)
 D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数 (m^2/s)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h_z : 混合層厚さ (m)
 k : カルマン定数
 Pl : 都市の人口 (人)
 q_h : 地表からの発生熱量 (W/m^2)
 q_{hs} : 1~3月の平均暖房熱量 (W/m^2)
 R_i : リチャードソン数
 t_a, T_a : 外気温 ($^\circ C, ^\circ K$)
 dt : 市内での上昇温度 ($^\circ C$)
 dT : 平均垂直温度勾配 ($^\circ C/m$, 添字 r は市外, u は市中を表す)
 dt_{u-r} : 市内の最高温度と市外平均温度の差 ($^\circ C$)
 U_* : 摩擦速度 (m/s)

- V_m : 水平方向の風速 (m/s)
- ΔV : 風速勾配 (1/s)
- Z : 高さ (m)
- Z_0 : 粗度定数 (m)
- ζ : 無次元高さ
- ζ_0 : 大気安定度のパラメータ
- r : 比重量 (kg/m^3)
- ϕ_n : 無次元温度勾配
- σ_T : 測定温度の標準偏差

2. 測定地域と測定方法

2.1. 測定地域

ルンド市 (東径 $13^\circ 14'$, 北緯 $55^\circ 43'$) は人口 8 万人で 6 km 四方の範囲に入る小都市である。周囲は平坦で広大な畑地であり、市内外の境界も明瞭であるために都市の影響を調査するためには好都合な地理的条件を有しているといえる。(写真-1)

2.2. 水平面温度分布の測定

自動車に支柱を設け、熱電対を高さ 1.7, 2.5, 3.3 m に設置した。写真-1 に示される No. 1~28 地点のコースを 90 分間で測定する。市内外の温度は一律に変動すると仮定し、気象観測所の 10 分間隔の温度変動に合わせて変動分を修正した。(写真-2)

2.3. 垂直温度分布の測定

ルンド市の中心及び市外で気球により垂直温度分布を測定した。直径 2 m の気球に 1 本の熱電対を設け、高さ 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m で温度を測定した。気球の糸の角度を測定しておき、実際の気球高度を算出した。(測定地点は写真-1 中の No. 21 及び 29 地点)

2.4. 測定期間

測定は 11 時頃及び 22 時頃開始して、自動車観測、気球観測に約 4, 5 時間要した。1977 年 9 月 17 日から 10 月 18 日まで日中 4 例、夜間 16 例の測定結果を得た。

3. 土地利用形態と熱消費量

3.1. 土地利用図

ルンド市は 4 千分の 1 地図に 1 件の独立住宅まで詳細に描かれており、500 m グリッド上に各土地利用の面積割合を読み取った(図-1)。工場は僅かであり大部分は独立及び集合住宅、事務所、学校、病院である。

3.2. 熱消費量

ルンド市の 65% は地域暖房されており、1 契約ごとに 3 ヶ月単位の地域暖房料金及び熱消費量の台帳がある。この台帳から地図上に熱消費量を記入した。地域暖房されていない地域は類似の地域暖房されている地域と同様の熱消費量があるとして、建築面積比を用いて推定した。

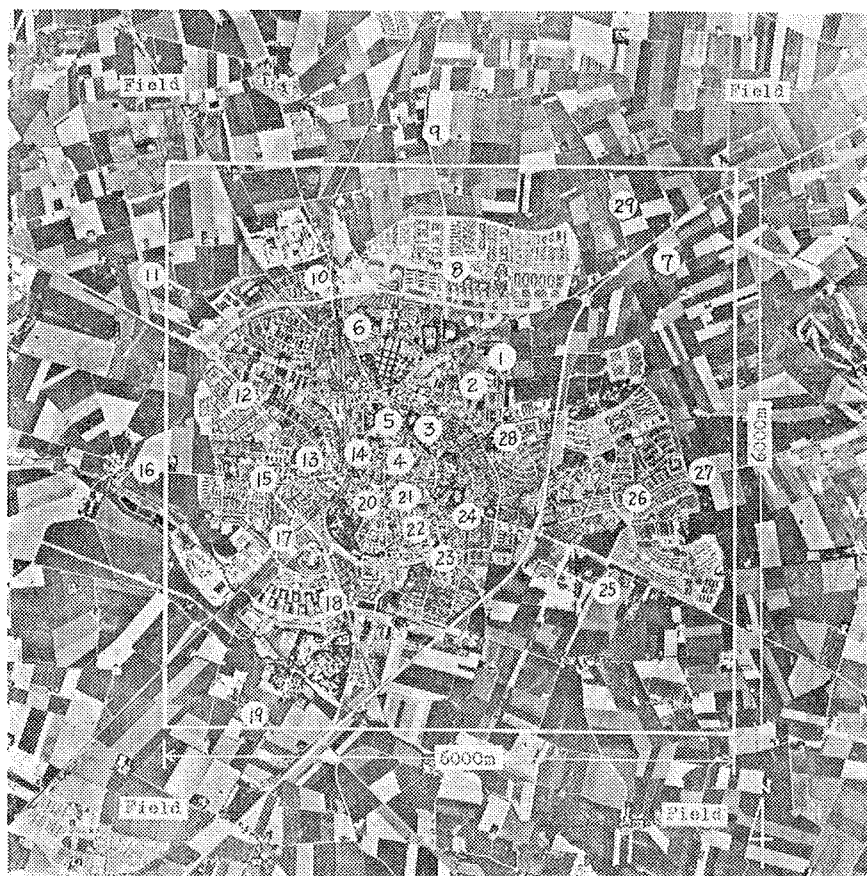


写真-1 ルンド市と観測地点

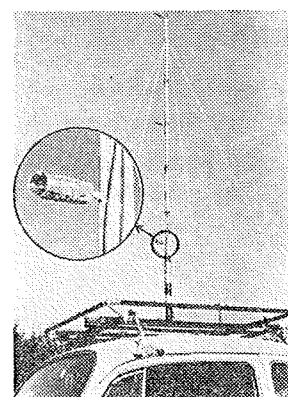


写真-2 自動車観測の温度測定器

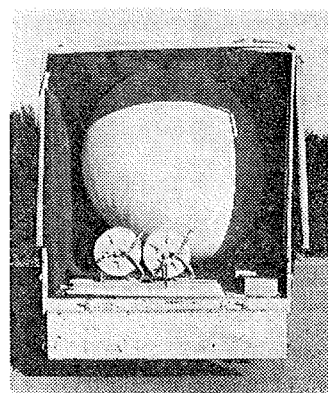


写真-3 観測気球

図-2に1～3月の平均暖房熱消費量の分布を示す。住宅の家事、照明用熱消費量は 0.4 W/m^2 で図-2中の数値の10%に相当する。

暖房用熱量は外気温の減少に対して直線的に増加しており、年間の熱消費量の変動から、人工排熱量 q_h は家事、照明用熱消費量を加算して次式で表現されるとした。

$$q_h = q_{hs} \cdot (1.21 - 0.0468t_a) \quad \dots\dots(1)$$

地域暖房プラントの熱供給量の日変化を見ると日中に比べて夜間は30～40%少いものの、通常は全日運転で建物熱容量の影響もあると考え、人工排熱量は外気温のみの関数とした。

4. 測定結果

4.1. Δt_{u-r} と風速

ヒートアイランド強度の指標として、市内の最高温度と市外の平均温度（写真-1中のNo. 7, 9, 11, 16, 19, 25, 27地点）の差を Δt_{u-r} と定義した。図-3に Δt_{u-r} と測定値の標準偏差 σ_T との関係を示す。大略直線的な関係にあり、 Δt_{u-r} は全体の温度分布の強弱を示しているといえる。

図-4に夜間の Δt_{u-r} と風速の関係を示す。一方、Okeは晴天時夜間のヒートアイランド強度を表す経験式として次式を得ている⁴⁾。

$$\Delta t_{u-r} = P^{[0.27/4.04V_m^{-0.56}]} \quad \dots\dots(2)$$

数値的オーダーとしては測定値と Oke の経験式は一致するものの、風速と Δt_{u-r} の関係は明瞭ではない。また Δt_{u-r} は風速が同じであっても晴天時と曇天時では大

きく異っており、 $0 \sim 6 \text{ m/s}$ の風速の範囲においては風速が直接ヒートアイランド強度に及ぼす影響は小さい。

4.2. 市内外の垂直温度勾配

市内外の垂直温度分布は大略直線で近似できる。測定可能高さは風速により異ったが、地上5mから40～100mであった。図5-1に市内外の垂直温度勾配を比較する。概ね市内外の垂直温度勾配は比例関係にあるものの、市外に比べれば市内は中立状態に近く、 $\overline{\Delta T_r} \gg \overline{\Delta T_u}$ である。また温度勾配が0以下のものは日中の測定結果である。

4.3. 市外の垂直温度勾配と Δt_{u-r}

図-6に市外の垂直温度勾配と Δt_{u-r} の関係を示す。相関係数0.83で直線的な関係である。Ludwigも0.3～2mの温度勾配とヒートアイランド強度との相関と同様の結果を得ており⁶⁾、ヒートアイランド強度に関しては市外の垂直温度勾配の影響が非常に大きいと考えられる。

4.4. 熱消費量と温度上昇

図-7は夜間における測定結果16例の各測定点での平均温度を算出し、その地区における熱消費量と比較したものである。温度上昇は熱消費量と直線関係ではなく、熱消費量が多い地域でも温度上昇は比例して増大していない。Chandlerはロンドンでの観測から都市に入ると温度は急上昇し、一定値に達すると結論しているが、ルンド市においてはそのような傾向は見られず、都市の大きさにより温度分布の形態は異ると考えられる。

5. 測定値と計算値の比較

5.1. Summers の計算モデルと測定値の比較

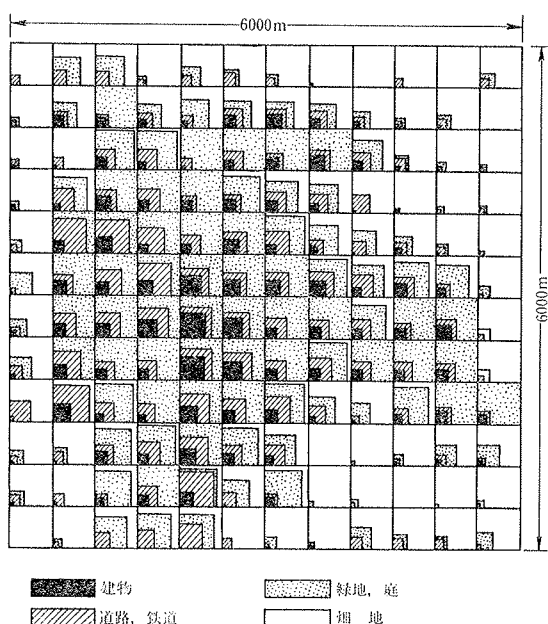


図-1 ルンド市の土地利用形態

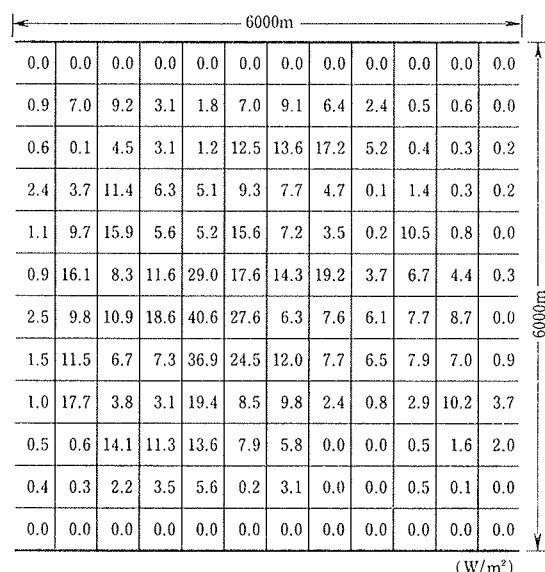


図-2 暖房による人工排熱量の分布

Summers はヒートアイランド現象を立体的に捉え、次式を提案した⁵⁾。ここでは高さ 25 m での測定風速の 3 分の 1 を $V_{mz=0}$ とした。

$$h_z^2 \left(V_{mz=0} + \frac{\overline{\Delta V} h_z}{3} \right) = \frac{2}{C_p \gamma \overline{\Delta T_r}} \int_0^x q_h dx \quad \dots\dots(3)$$

$$\Delta t = \overline{\Delta T_r} \cdot h_z \quad \dots\dots(4)$$

Summers のモデルによれば風上側の都市境界から温度は上昇して、風下側の都市境界で最大の Δt になる。しかし、実測によれば最大の Δt は、市中心部に形成されるので、水平温度分布を Summers のモデルによって予測する事は難しい。

図-8 は計算による Δt の最大値と Δt_{u-r} の測定値を比較したものであり、相関係数 0.7 で一致している。

図-8 中に風向を示した。この中で風向が東または北東の場合は測定値の方が大きく、西または南西の場合は計算値の方が大きい。これは風速測定の地点が東側にあり、北東または東風の場合、市外の強い風速を検出し、西風の場合は都市粗度により減速された風速を検出しているためである。

5.2. 3次元計算モデル⁽¹⁾と測定値の比較

a. 風速と拡散係数の分布

本実測において風速は高さ 25 m で測定しているだけであり、風速分布や拡散係数の分布は測定していない。また都市上空における風速分布についてはある程度報告されているものの、拡散係数については見当たらない。

一般流の風速分布算出に関しては粗度定数 Z_0 は東京での測定結果から 1.65 m とし、ウツサラ市での測定結果及び計算値と測定値の比較から $\zeta_0 = -0.3$ とした。Businger, Högström 等による理論式及び経験式を用いて拡散係数は次式で与えられるとした (KEYPS Formula)²⁾³⁾。 T_1, T_2 は Z_1, Z_2 における温度である。

$$R_1 = \frac{g}{T_0} \frac{z (\ln z/z_0)^2}{\ln z_2/z_1} \frac{(T_2 - T_1)}{V_m^2} \quad \dots\dots(5)$$

$$R_1 = \zeta (0.74 + 4.7\zeta) / (1 + 4.7\zeta)^2 \quad \dots\dots(6)$$

$$\phi_h = 0.74 + 4.7\zeta \quad \dots\dots(7)$$

$$D_z = k U_* z / \phi_h \quad \dots\dots(8)$$

KEYPS Formula により試算を行うと ζ_0 の違いにより

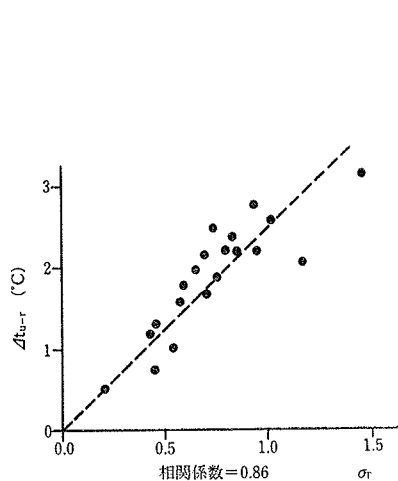


図-3 σ_T と Δt_{u-r}

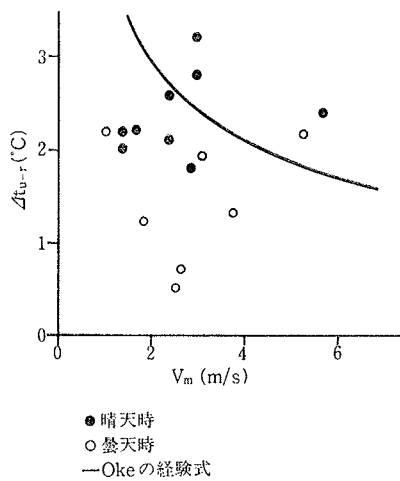


図-4 風速と Δt_{u-r}

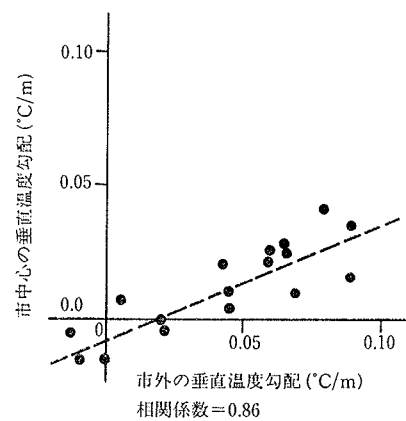


図-5 市内外の垂直温度勾配の比較

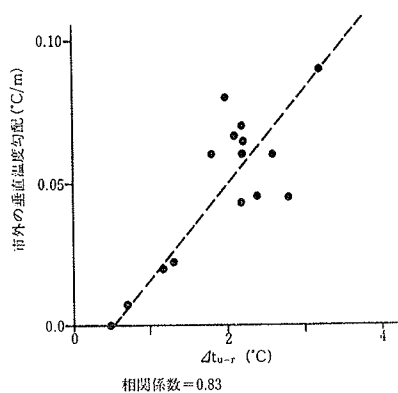


図-6 Δt_{u-r} と市外の垂直温度勾配

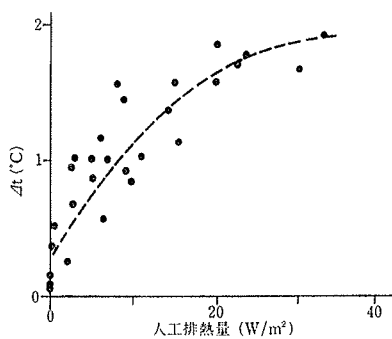


図-7 上昇温度 Δt と人工排熱量

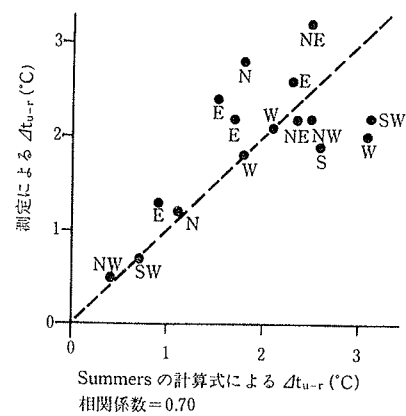


図-8 Δt_{u-r} の計算値と測定値の比較

U_* は大きく変化しないので、一定値として扱った。(5)~(8)式は1次元拡散を前提としており、都市の拡散に適用できるかどうか疑問であるが、大局的には可能であろうと仮定した。他の文献においても KEYPS Formula が用いられており、また既報の模型実験でも同様の仮定を用いて計算値と測定値の間に良好な一致が得られているからである。

都市を横切る風は都市の粗度により20~40%減少すると報告されている。図-8から推測できるようにこの影響は明瞭に現れており、本計算においては東風の場合は測定値の50%の値を、北風の場合は75%、西風の場合は、100%として一般流の風速を算出した。

b. 数値計算法

X, Y, Z の計算グリッドは $6 \times 6 \times 20$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は、 $1,000 \text{ m} \times 1,000 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ である。前提条件として一般流及び市外の垂直温度勾配を与えた。都市からの発熱量は人工排熱量だけとして図-2及び、(1)式より算出した。

c. 測定結果と計算結果の比較

図-9~11に3例の比較を示す。図-9は弱い安定時の例で垂直温度分布があまり一致していないが、等温線図は概ね一致している。図-10は強い安定時のもので、測定値と計算値で風向が異なるように見えるが、全体としては良好な一致を示している。図-11は3例中最も良い一致を示している。図-1中のNo.1~28地点における測定値と計算値を比較すると、相関係数は0.82~0.88である。

る。

Summers の計算モデルによる混合層厚さは図9~11で各々56 m, 35 m, 33 m であるが、測定結果によれば70 m 50 m, 60 m 前後である。これは Summers が市内の垂直温度勾配を中立と仮定しているのに対して、図10, 11では市内でも垂直温度勾配があるためと考えられる。

6. 結論

本報告は小都市においてヒートアイランドの測定を行い、計算値と測定値を比較したものである。要約すると、

- (1) 市内外の垂直温度勾配は概ね正比例の関係にあるものの、市内の垂直温度勾配は市外に比べると中立に近い。
- (2) ヒートアイランド強度 dt_{u-r} は市外の垂直温度勾配と密接に関係しており、概ね直線関係にある。
- (3) Summers のモデルによりヒートアイランド強度の計算値と測定値を比較すると、最大上昇温度は概ね一致するものの、温度分布に関しては良好な一致が見られない。
- (4) 風速や拡散係数の分布に関しては KEYPS Formula を用いて、数値計算モデルと測定値を比較すると概ね良好な一致が見られ、計算値と測定値の相関係数は0.82~0.88であった。

7. 謝辞

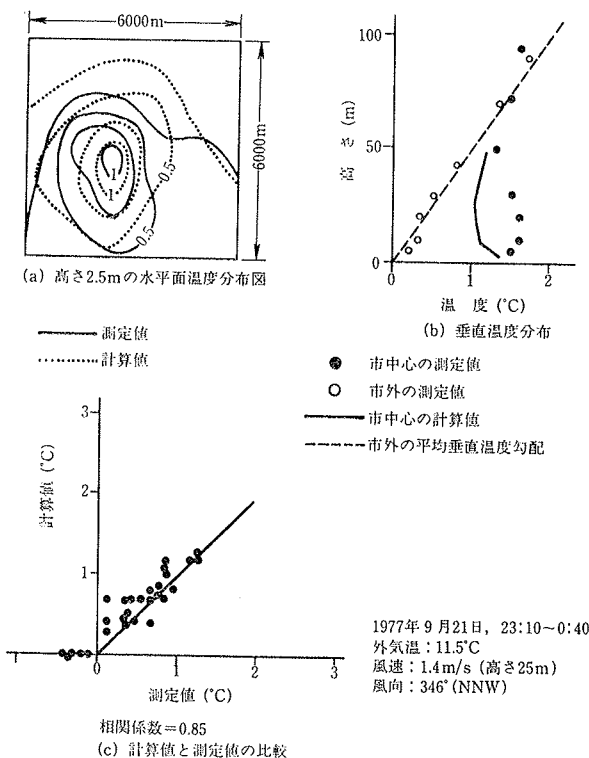


図-9 温度分布の計算値と測定値の比較

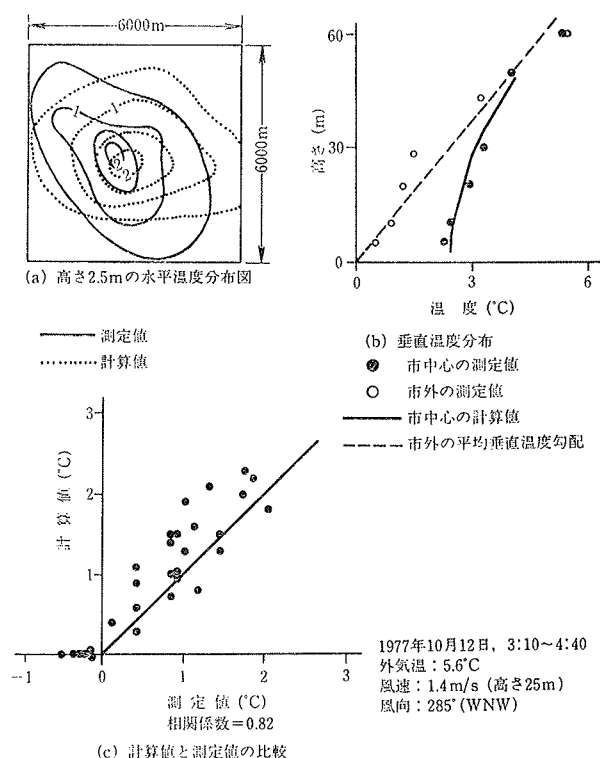
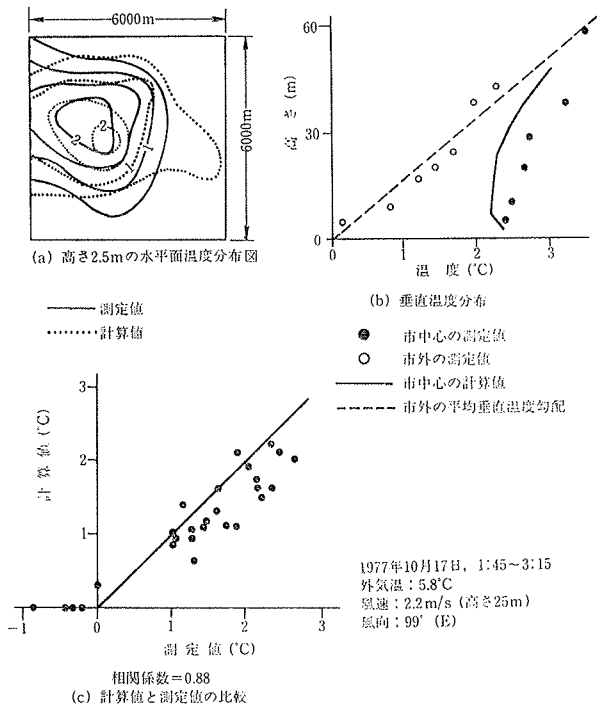


図-10 温度分布の計算値と測定値の比較



図一11 温度分布の計算値と測定値の比較

本研究を行うに当り、ルンド工科大学 Adamson 教授, Källblad 研究員から多くの助言, 協力を載いた。また測定は Lundh 技術員の協力による所が大きい。これらの方々に深謝の意を表する次第である。

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) Businger 他: Flux-Profile Relations in the Atmospheric Surface Layer, J. of Atm. Sci. 28, (1971)
- 3) Höögström: A field study of the turbulent fluxes of heat, water vapour and momentum at a typical agricultural site, Q. J. R. Met. Soc., Vol. 100, (1974)
- 4) Oke: City Size and the Urban Heat Island, Atm. Env. 7, (1973)
- 5) Summers: An Urban Heat Island Model, Presented at the First Canadian Conference on Micrometeorology in Toronto, (1965)
- 6) Ludwig: Urban Temperature Fields, W. M. O. Technical Note, No. 108, 254, (1970)