

# 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション 地表面境界条件の高精度化

一ノ瀬 俊 明\*<sup>1</sup>・下堂 蘭 和 宏\*<sup>2</sup>・鶴 野 伊津志\*<sup>3</sup>・花 木 啓 祐\*<sup>4</sup>

## 要 旨

エネルギー消費を通じて人間活動がどの程度ヒートアイランドに寄与しているのかを定量化し、都市の熱環境を緩和する手段としてのエネルギー消費削減の有効性を検討するため、東京23区をフィールドとして局地気象モデルによる数値シミュレーションを行った。細密地理情報にもとづいて地表面境界条件の高精度化をはかることにより、人工排熱の時空間分布構造が都市の熱環境に与える影響の評価が可能となった。冬季は海風が弱いため明瞭なヒートアイランドが終日現れ、周辺との気温差は最大で約2.6°Cに達した。また20時頃には人工排熱量の多い大手町、新宿、池袋に高温の極が認められた。都心部における人工排熱の影響は夏季に最大1.5°C、冬季に最大2.5°Cと見積もられたが、給湯用エネルギーの50%及び冷房用エネルギーの100%を削減した場合の効果は最大で-0.5°Cに過ぎなかった。

## 1. はじめに

都市が広域化し、都市のアクティビティーが高まるにつれて、都市環境へは様々なインパクトが与えられるようになる。大気汚染・水質汚濁等はそれらの原因物質を技術的に除去することが可能であるが、エネルギー消費に伴って発生する都市人工排熱については、原理的にこれを除去することができず、環境中へ放出されることになる。また都市の人工排熱は、アスファルト等地表面の人工的な被覆と並んでヒートアイランド等都市特有の局地気候に寄与しており、最近では数値シミュレーションでもこのことが裏付けられている(例えば、Kimura and Takahashi, 1991など)。

一方、気象学の方野における都市大気モデリングの近年の発展はめざましく、総観規模条件、地表面境界条件等を与えることにより、その日変化がかなりの

精度で再現されるようになってきている。地表面の特性を与える境界条件の精度もそれに比例して向上させることができるならば、土地利用の改変や人工排熱を通じ、人間活動が都市の熱環境に与えるインパクトをより正確に評価し得るであろう。また、都市構造や人間活動の制御がどの程度こうしたインパクトを軽減し得るのかを定量的に明らかにするためにも、地表面境界条件の重要な要素である都市人工排熱の詳細なデータを、ヒートアイランド等の数値シミュレーションに反映させていくことが必要である。

人工排熱のソースであるエネルギー消費そのものについては、従来国レベル、地方レベルでの解析例はある程度存在するものの、都市レベル、とりわけ都市の内部における時空間分布構造の解析は、エネルギー消費量の計測を通じた広域的な現地調査が困難であるためかほとんど行われていない。しかし、都市のエネルギー消費活動の熱環境インパクト評価に当たっては、エネルギー消費の時空間分布構造の把握は必要不可欠である。これについては、最近著者らが細密地理情報及びエネルギー消費量の原単位を活用し、東京23区におけるエネルギー消費の時空間分布構造を詳細に記述する試みを行っている(第1図)。

従来簡略化された形でしか用いられていなかった局

\*<sup>1</sup> 東京大学先端科学技術研究センター(現:国立環境研究所地球環境研究センター)。

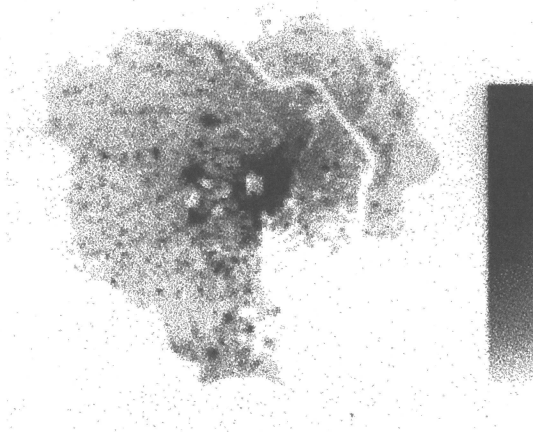
\*<sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科(現:東京海上火災保険株式会社)。

\*<sup>3</sup> 国立環境研究所大気圏環境部。

\*<sup>4</sup> 東京大学先端科学技術研究センター。

—1996年1月8日受領—

—1997年7月14日受理—



第1図 東京23区における人工排熱分布(一ノ瀬ほか, 1994). 冬季の14:00の例. 凡例はフルスケールで400 W/m<sup>2</sup>. 解像度は250 mである.

地気象モデル地表面境界条件としての人工排熱について、細密地理情報等にもとづいてその高精度化をはかることにより、人工排熱の時空間分布構造が都市の熱環境に与える影響の評価が可能となる。そこで本研究においては、エネルギー消費を通じて都市構造・人間活動が、それぞれの程度ヒートアイランド等都市特有の気候に寄与しているのかを定量化し、都市の熱環境を緩和する手段としてのエネルギー消費削減等の有効性を検討するため、東京23区をフィールドとして局地気象モデルによる数値シミュレーションを行った。その際、一ノ瀬ほか(1994)により推定されたエネルギー消費の時空間分布構造を人工排熱のそれとみなし、地表面境界条件として入力した。基本的にはインフラストラクチャの整備やライフスタイルの転換等、都市活動に重大な影響を生じない範囲でのエネルギー消費抑制シナリオを検討し、3次元大気モデルを用いていくつかのシナリオの下で数値計算を実行し、それらの熱環境緩和効果を評価することとした。

## 2. 局地気象モデルについて

### 2.1 局地気象モデルの概要

本研究で使用した局地気象モデルは、Pielke(1974)を原型とし、Kessler and Douglas(1992)によって改良・修正が行われたCSU-MM(Colorado State University Mesoscale Model)に対し、アルベド等地表面の様々な特性値や人工排熱をグリッド毎にファイルか

ら与える形に改良したものである。基礎方程式は静力学平衡、ブシネスク近似をもとに非圧縮を仮定しており、Terrain-followingの座標系、運動方程式、熱エネルギーの保存式、水蒸気の保存式、連続の式等で構成される。また乱流拡散係数はTherry and Lacarrere(1983)に従い、乱流エネルギーと長さのスケールを用いて計算している。この際混合層高度をUlrickson and Mass(1990)の方法で与えている。

モデルは $z^*$ 座標系

$$z^* = \bar{s} \frac{z - z_g}{\bar{s} - z_g} \quad (1)$$

(ここで、 $\bar{s}$ はモデル領域上端の高さ、 $z_g$ は標高)で、物理変数に通常の記法を用いて以下のように書ける。

運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} = & -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \left( \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} \\ & + \left( \frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) + f(v - V_g) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{Dv}{Dt} = & -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \left( \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_g}{\partial y} \\ & + \left( \frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) - f(u - U_g) \end{aligned} \quad (3)$$

静力学の式：

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = - \left( \frac{\bar{s} - z_g}{\bar{s}} \right) \frac{g}{\Theta} \quad (4)$$

ここで、 $\pi$ はExner functionであり次式で定義される。

$$\pi = c_p \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\Gamma_d}{c_p}} \quad (5)$$

熱エネルギーの保存式：

$$\frac{D\Theta}{Dt} = \left( \frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_h \frac{\partial \Theta}{\partial z^*} \right) + S_\theta \quad (6)$$

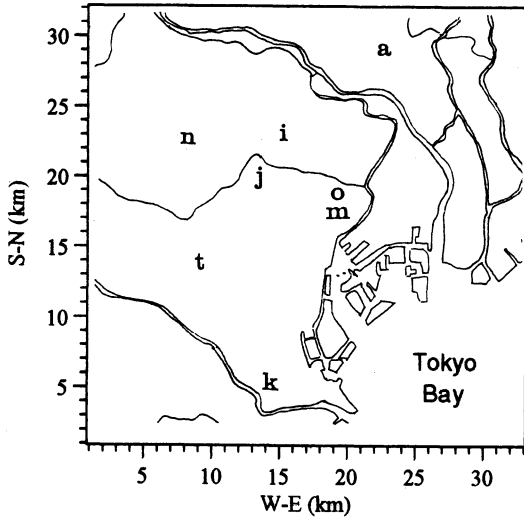
水蒸気の保存式：

$$\frac{Dq}{Dt} = \left( \frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_h \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \quad (7)$$

連続の式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{\bar{s} - z_g} \left( u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0 \quad (8)$$

以上の式において、 $u$ 、 $v$ はそれぞれ東西、南北成分の風速、 $\theta$ は温位、 $q$ は比湿、 $f$ はコリオリ係数、 $S_\theta$ は大



第2図 解析対象領域と主な大気環境時間値等気温データ観測地点。記号はそれぞれ、n:中野、t:世田谷、j:新宿、i:池袋、k:蒲田、m:丸の内、o:大手町、a:足立である。このうち、蒲田の実際の名称は大森であり、大手町は AMeDAS の観測地点である。

気放射によるソース項である。また、 $c_p$  は乾燥空気の定圧比熱、 $g$  は重力加速度、 $K_h$  は温位、比湿に対する乱流拡散係数、 $K_m$  は流れ場に対する乱流拡散係数、 $p$  は大気圧、 $p_0$  は基準気圧 (1,000 hPa)、 $U_g$  は  $x$  方向の地衡風速、 $V_g$  は  $y$  方向の地衡風速、 $\Gamma_d$  は乾燥断熱減率である。 $D/Dt$  は  $z^*$ 座標系での実質微分を意味する。

数値シミュレーションにおける水平差分は3次元スプライン関数による風上差分であるが、鉛直拡散項のみは重み付きのクランク・ニコルソン法によった。一方人工排熱を組み込んだ地表面熱収支式は、式 (9) のように表される。

$$Q_{sfc} = SR_{sfc} + IR_{sfc} + \rho c_p u^* \theta^* + \rho L_v u^* q^* - \sigma T_{sfc}^4 - \rho_s c_s K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + Q_{m,n,o} \quad (9)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度、 $u^*$  は摩擦速度、 $\theta^*$  は摩擦温位、 $L_v$  は水の気化熱、 $q^*$  は摩擦比湿、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数、 $T_{sfc}$  は地表面温度である。地表面構成物質については、 $\rho_s$  は密度、 $c_s$  は比熱、 $K_s$  は熱拡散係数、 $T_s$  は地中温度である。右辺の各項は順に、日射による短波放射、大気からの長波放射による加熱、顕熱輸送、潜熱輸送、地表面からの長波放射による冷却項、地中への伝熱項、人工排熱である。左辺の  $Q_{sfc}$  は地表面 (地中の最上層) の温度を上げるのに使われ

得る熱量である。大気からの長波放射は二酸化炭素と水蒸気の効果のみを考慮している (Pielke, 1984)。また地中の温位は熱伝導方程式による。

## 2.2 計算条件及び入力データ

東京23区を包含する矩形領域 ( $\Delta x = \Delta y = 1$  km) は東西33グリッド、南北32グリッドに分割される (第2図)。鉛直方向には大気3層 (上空8,000 mまで)、地中11層 (地中50 cmまで) に分割される。計算領域は一辺30 km強と極めて狭いため、中部山岳域の熱低気圧による大規模海風 (例えば、Kondo, 1991など) 等の効果などを考慮できない。また地表面境界条件を与える土地利用データは、東京都都市計画局による25 mポイントサンプリングデータ (昭和61年度) を1 kmグリッドに集約 (面積による加重平均) して用いた。本モデルでは土地利用データはアルbedo、蒸発効率 (地表面の水分のうち自由に蒸発できる割合)、地表面粗度、密度、比熱、熱拡散係数の各種地表面パラメーターとして用いられる。国土数値情報の土地利用分類と各種地表面パラメーターとの対応関係は、Anthes *et al.* (1987) を参考に第1表のように与えられる。国土数値情報の土地利用分類は東京都都市計画局のそれとは一致しないので、両者の対応関係を仮定した。

東京都都市計画局 (1986) によれば、皇居及び赤坂御所は官公庁施設に、明治神宮は教育文化施設に分類されている。実際にはこれらは広大な緑地であり、緑地か建物用地かの相違は、計算結果に対し感度の大きい蒸発効率に対しては大きな差をもたらす。このようなまとまった緑地を建物用地にカウントすることは避ける必要がある。よって面積が大きく、周辺への熱的な影響が大きいと判断される緑地としてこれらの3か所を取り上げ、皇居、赤坂御所を「公園、運動場等」に、明治神宮を「森林」に分類し直した。また、東京23区を包含する矩形のフィールドを設定したため、周辺領域には土地利用データの存在しない部分が生じる。よって次の2つの方法によりデータの欠損を補った。1) 東京23区の境界領域にあり、全土地利用種の合計面積が1 km<sup>2</sup>未満となるグリッドについては、欠けている部分には存在している部分と同じ割合で土地利用種が存在するものとした (1,056グリッド中236グリッドが該当)。2) 東京23区の境界の外にあり、土地利用情報が完全に欠落しているグリッドについては、1) の状況を参考に畑:荒地:建物用地:幹線交通用地=1:7:6:2の存在比を仮定した (1,056グリッド中336グリッドが該当)。また、人工排熱は一ノ瀬ほか

第1表 土地利用分類毎の各種地表面パラメーター。

土地利用分類	アルベド	蒸発効率	地表面粗度 (cm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比熱 (cal/g/K)	熱拡散係数 (cm <sup>2</sup> /s)
田	0.17	0.50	10.0	1.8	0.28	0.0053
畑	0.17	0.30	10.0	1.8	0.28	0.0053
果樹園	0.16	0.30	50.0	1.8	0.28	0.0053
樹木	0.16	0.30	50.0	1.8	0.28	0.0053
森林	0.16	0.35	50.0	1.8	0.28	0.0053
荒地	0.14	0.20	15.0	1.8	0.28	0.0053
建物用地	0.18	0.05	50.0	2.4	0.21	0.0072
幹線交通用地	0.18	0.05	50.0	2.1	0.21	0.0038
その他の用地	0.18	0.10	20.0	1.8	0.28	0.0053
水面	0.08	1.00	0.0001	1.0	1.00	0.0053

(1994)をもとにグリッド毎に業種・用途(冷房, 暖房等)別の内訳やそれぞれの季節変化・日変化を与えており, 様々なシナリオに対応が可能である. 但し2)の336グリッドについては人工排熱を与えていない. 建築階数の情報をもとに人工排熱を高さ別に与えることも可能であるが, 今回は都市キャノピー層をモデリングしていないこともあり, すべての人工排熱を地表面に与えている.

数値計算上の安定性を確保するため  $\Delta t=10$ 秒に設定し, 解析対象日の6時より24時間分の変化を追う. 日中における混合層の発達に対しては, 温位勾配の履歴が大きく影響する(例えば, 近藤, 1994など)ため, 計算気温と実測気温とを比較するためには, 厳密には24時間以降の積分結果を用いるべきであると考えられる. しかし計算領域を狭く設定しているため, 長時間の計算に対しては領域内に熱が滞留することにより上空の気温が上昇する傾向が見られたため, これを回避すべく計算開始後24時間分を解析することとした.

ヒートアイランドが顕著になる気象条件としては, 冬季の夜間(例えば, 河村ほか, 1986など), 雲のない晴天(例えば, 山添・一ノ瀬, 1994など), 風が弱いこと(例えば, 藤野ほか, 1994など)などが知られている. また, 実際にヒートアイランドが都市生活に不快感をもたらしているのは夏季の日中の猛暑や熱帯夜を通じてである. よって解析対象日としては, 一ノ瀬ほか(1994)が示した1989年の人工排熱データを用いるため, 1989年を対象に夏季と冬季の典型的な静穏日を1日ずつ選択することとした. 極東天気図及びAMeDASデータより, 夏季については1989年7月21日, 22日, 23日及び8月8日が, 冬季については1989年2月2日, 3日, 4日が静穏日として選択され, 7

月22日及び2月3日が解析対象日として選択された. 6時における地上の気温, 相対湿度, 風向・風速等の初期値は計算領域(陸上)全体で一様とし, 大手町(AMeDAS等)の観測値(全静穏日の平均値)を与えた. 計算の初期条件を第2表に示す. なお計算領域内のグリッドの標高はすべて0 mとしている.

以上にも示したとおり, 本研究においては関東にある東京23区を対象としているのではなく, 東京23区のみを切り出して解析しているわけであるが, 計算領域の側方境界付近における計算結果には, 数値計算上の問題点や地表面境界条件に関する情報の欠如等が影響している. よって以下の議論では, 側方境界付近の数メッシュについては考察の対象から外してある. なお, 側方境界における気温の水平勾配を0としている.

### 3. 数値シミュレーションの結果

#### 3.1 気温の水平分布

地上7.5 m(鉛直第2層のグリッドの中心点の高さ)における気温及び風系の水平分布を夏季(第3図), 冬季(第4図)それぞれの場合について示す.

夏季の11時には内陸と海上との気温差は5°C程度に達し, 海風は5 m/s程度に発達する. 海風吹送域では等温線がほぼ等間隔であり, 湾岸にほぼ平行に走っている. 湾岸付近では局地的な高温域等複雑な温度場が形成されているが, 埋立地の分布などが影響しているものと考えられる. 14時には地上気温の上昇に伴って海風吹送域は内陸に広がり, 午前中に見られたような島状の高温域は見られない. 20時には, 内陸の冷却に伴って日中顕著であった気温場の傾きは緩和される. 23時には陸上にほとんど風がなく, 新宿付近を中心とするヒートアイランドが現れ, 荒川に沿った地域にはク

第2表 計算の初期条件(6時の値). ともに北緯35.6度とし, 風向・風速は全層一律とした. 地表面温度及び地中温度の初期値は, 簡単のため地上気温の初期値に一致させた.

	夏季	冬季
日付	7月22日	2月3日
地上気圧 (hPa)	1,000	1,010
地上気温の初期値 (K)	298.0	276.0
海面水温 (K)	298.0	280.0
温位の鉛直勾配 (K/km)	5.5	6.0
地上の相対湿度 (%)	70.0	60.0
風向	S	NW
風速 (m/s)	0.5	0.5

リップも見られる.

冬季には夏季と異なり, 11時の段階において明瞭なヒートアイランドが見られ, ヒートアイランド強度(明瞭なクリップの外側と都心との気温差)は約1.2°Cに達する. ヒートアイランドの中心は丸の内付近であり, 海側に勾配の大きなクリップが存在する. 14時には内陸と海上との気温差は約4°Cに達し, 新宿付近まで達する約3~4 m/sの海風が吹いている. ヒートアイランドの中心は風下の新宿付近に移動している. 17時には海風吹送域はさらに拡大し, 世田谷, 中野, 足立付近に達する. また, 等温線のパターンは夏季のそれに類似したものとなるが, 大手町付近や新宿付近には等温線の間隔がゆるやかな場所があり, 人工排熱の影響が現れている. 20時には内陸の急激な冷却に伴って海風は弱まり, 再びヒートアイランドが現れる. 人工排熱量(第5図, 第6図)の多い大手町付近, 新宿付近, 池袋付近に高温の極が見られ, ヒートアイランド強度は約2°Cである. また南部の蒲田付近にも高温域が見られる. 23時には風系が西寄りとなり, ヒートアイランドも大きく変形する. 都心の降温に対して西部における降温は大きく, ヒートアイランド強度は約2.6°Cに達する. 夏季とは対照的に夜半を過ぎてもヒートアイランドは継続して現れている.

新宿付近と大手町付近の2つの高温の極が顕著に見られたが, 夏季においては海風の影響のため大手町付近には見られなかった.

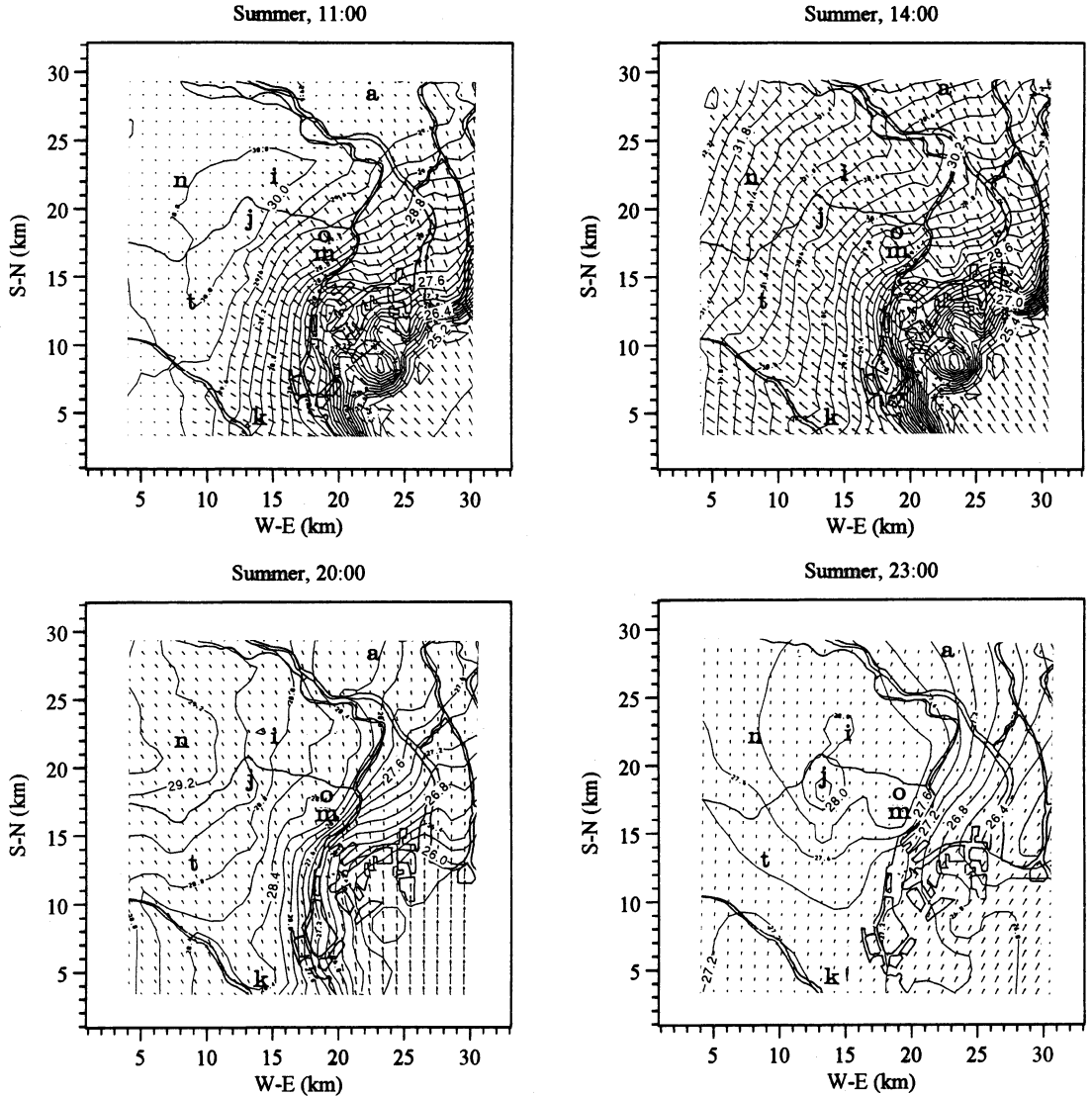
### 3.2 地表面熱収支

ヒートアイランドの原因を調べるため, 都心(大手町を含むグリッド)における地表面熱収支を図化した(第7図). 但し長波放射については, 大気からのものと地表面からのものをまとめて正味の長波放射として

扱っている. 図中地表面が熱を受け取る方向の熱輸送を正にとっているため, 上向き顕熱輸送や地中への下向き熱伝導は負の値で表現される.

夏季においては, 日中の短波放射が他の項に比べ圧倒的に大きく, 12時に最大800 W/m<sup>2</sup>以上に達する. それに対し人工排熱は4分の1程度の値である. 大手町付近にはオフィスが多く, 日中人工排熱は約200 W/m<sup>2</sup>を維持しており, その後は徐々に減少する. 午前中は地中への下向き熱伝導の割合が大きく, 9時に地中熱伝導のピークがある. その後地中が熱的に飽和していくためこの値は減少する. 上向きの顕熱輸送及び潜熱輸送は, 短波放射のピークよりやや遅れて13時にピークとなる. 顕熱の最大値は約300 W/m<sup>2</sup>であり, 藤野ほか(1993)がアスファルト舗装面において実測した値とほぼ整合する. 当該グリッドは皇居の堀などを含んでいるため, 日中の潜熱は顕熱よりも3割程度大きな値をとる. 19時以降は日没のため短波放射はなくなり, 顕熱, 潜熱はともに0に近づく. また地中熱伝導は17時に向きが逆転し, 夜間は正味長波放射と平衡する.

冬季においては短波放射のピークは約550 W/m<sup>2</sup>であり, 夏季よりも4割ほど少ない. これに対し人工排熱は8時において夏季の2倍以上のピークを持ち, 短波放射とほぼ同じ水準である. 一ノ瀬ほか(1994)によれば, これは暖房需要がこの時間帯に集中しているためである. 人工排熱の急激な立ち上がりのため, それが地中熱伝導などに振り分けられるまでに多少のタイムラグが生じ, 「地表面に行き場のない熱が溜まる」状態が見られる. これはこの時間帯における地表面温度の急激な上昇を意味している. 下向きの地中熱伝導は7時以降飛躍的に増加し, 11時にピークの約400 W/



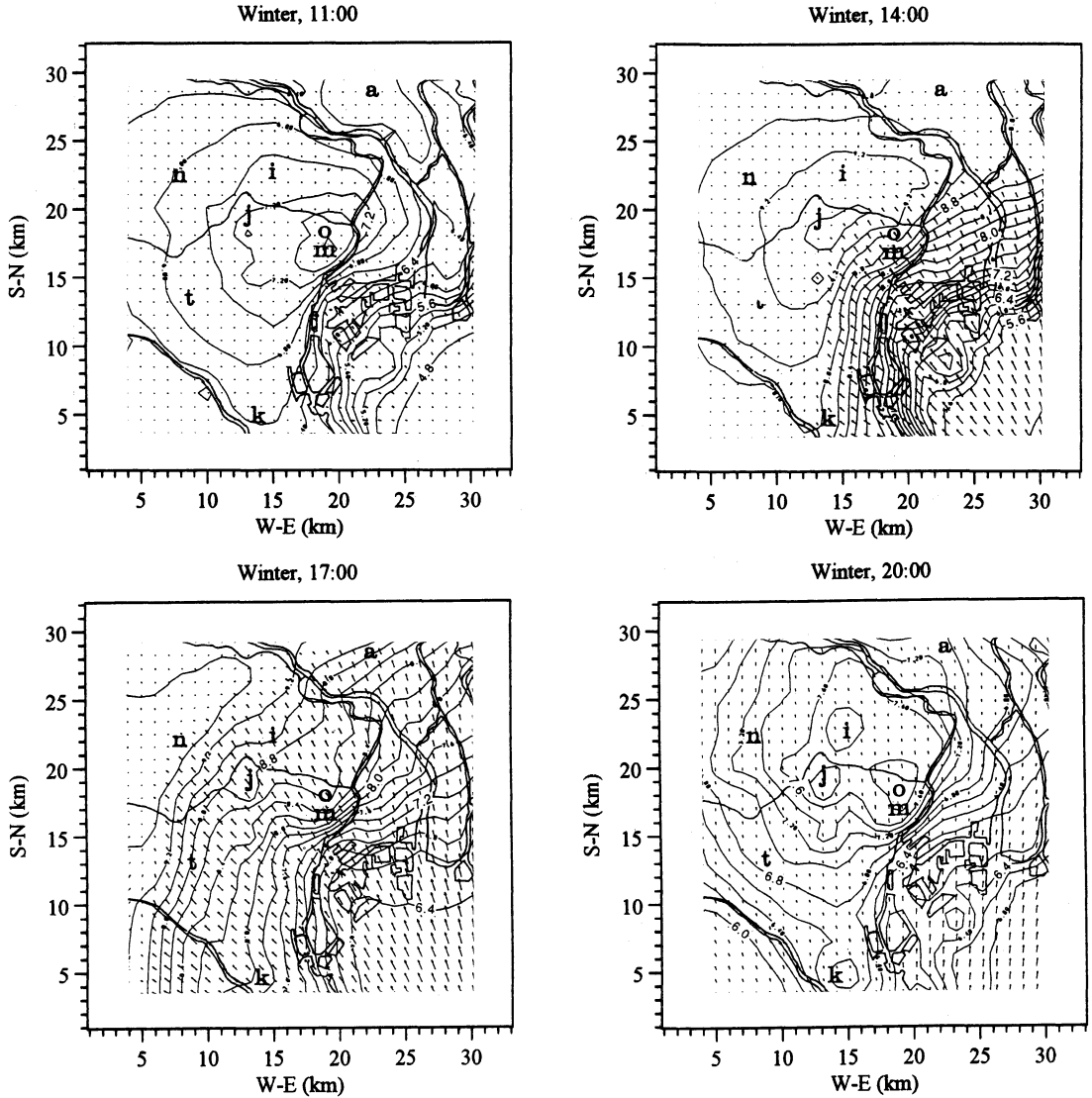
第3図 地上気温及び地上風系の水平分布 (夏季の例)。記号は第2図に同じ。等値線上の数値は地上気温 (°C) を示す。

m<sup>2</sup>に達する。この値は夏季の約300 W/m<sup>2</sup>よりも大きい。人工排熱と短波放射のそれぞれのピークに対応する形で、顕熱も10時と13時の2つのピークを持つ。また夏季とは逆に潜熱は顕熱の半分程度でしかなく、気温が低いことにより水分の蒸発量が少ないためと考えられる。正味長波放射のピークや地中熱伝導の向きが逆転する時間帯は夏季よりも1時間早く訪れる。夜間は正味長波放射と人工排熱、上向き地中熱伝導が平衡する。

#### 4. 実測データとの照合

##### 4.1 比較対象となる実測データ

水平分布の解析に使用した地上7.5 mの気温の計算値に対し、実測気温 (全静穏日の平均値) との比較を行いモデルの特性を調べた。気温の実測データとしては AMeDAS (大手町, 中新井, 新木場) のものがあり、毎時の計測が行われているが、地点数が少ない。一方自治体によって設置されている大気汚染常時監視測定網 (大気環境時間値) のうち、毎時の風や気温を観測している地点 (解析対象日に欠測のないもの) は22か



第4図 地上気温及び地上風系の水平分布 (冬季の例)。記号は第2図に同じ。等値線上の数値は地上気温 (°C) を示す。

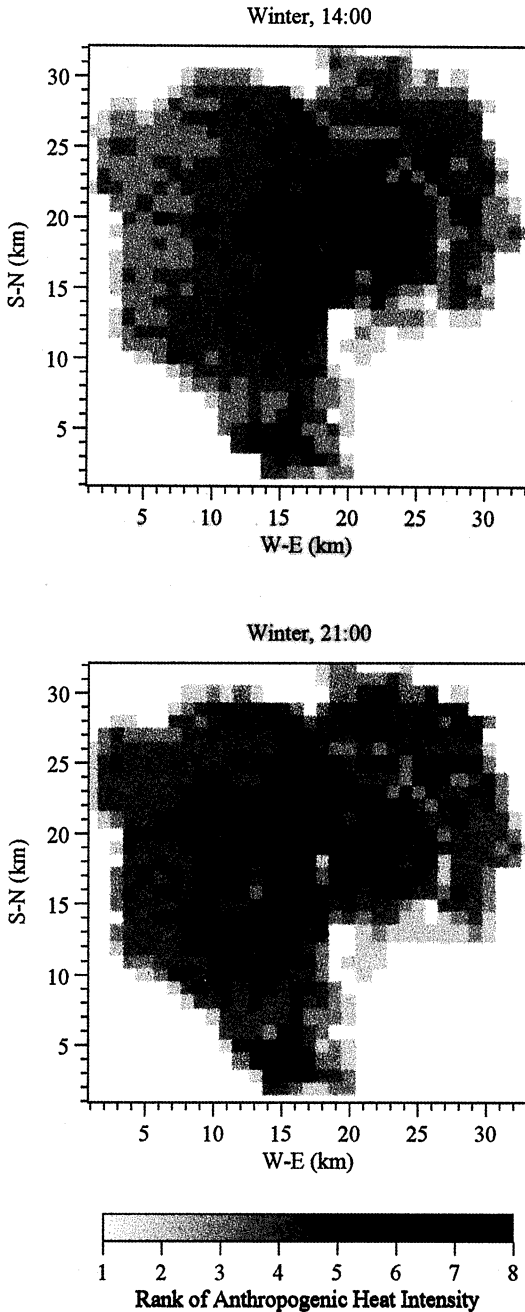
所存在する。観測地点の空間密度としては細かいものの、AMeDASのように気温を計るための露場を設けているわけではなく、個別に見れば設置条件に問題があるところも多い。

これらの気温データ (大気環境時間値及びAMeDAS) と照合させるのは、各観測地点を含むグリッドにおける計算値である。

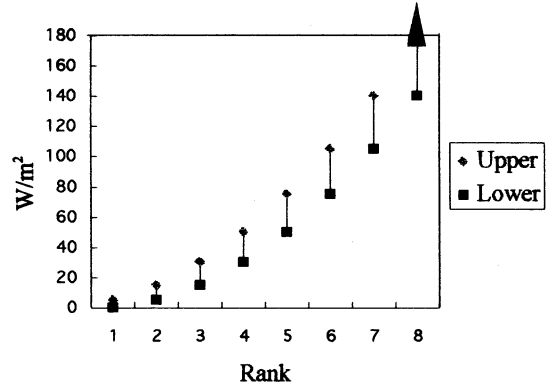
#### 4.2 各観測地点における照合

夏季において、日中比較的両者が一致している地点は、大手町 (第8図) など計算領域の中心付近にある

17地点である。しかし、夕方から夜間、翌朝にかけては計算気温が2~3°C高く見積もられる傾向がある。この原因としては、人工排熱をリアルタイムで地表面に与えており、建物の熱容量を地表面の熱容量で置き換えているため、気温に対する人工排熱の影響が遅れすぎてしまうことや、中高層建築からの人工排熱をすべて地表面に与えており、排熱の高度を考慮していないことなどが考えられる。またモデル中では都市キャノピーの効果を考慮しておらず、複雑な都市地表面の影響が十分に再現されていない可能性もある。



第5図 数値シミュレーションに用いられた人工排熱分布(冬季の例)。ランク(濃淡)と排熱強度との対応関係を第6図に示す。



第6図 第5図におけるランク(濃淡)と排熱強度との対応関係。

冬季の7時における実測気温によれば、大手町の3.4℃に対し最も低い久我山で0.3℃と約3℃の差がある。気温の初期値を大手町の実測気温に統一したことが、他の地点における計算気温と実測気温とのずれをもたらしている(第10図参照)。初期値を3段階に振った場合、大手町における計算気温は初期値の差を維持しながらほぼ平行に日変化する(第9図)。よって以下の議論では計算気温の絶対値は重要視せず、初期値が一致するよう計算気温のグラフを平行移動させた後の値を実測気温と比較する。しかしポーエン比などが気温依存性を持つため、この考え方は緑地など蒸発効率の高いところでは成り立ちにくいと考えられる。よって、実測気温との比較は蒸発効率の比較的低い都市地域に限定した。

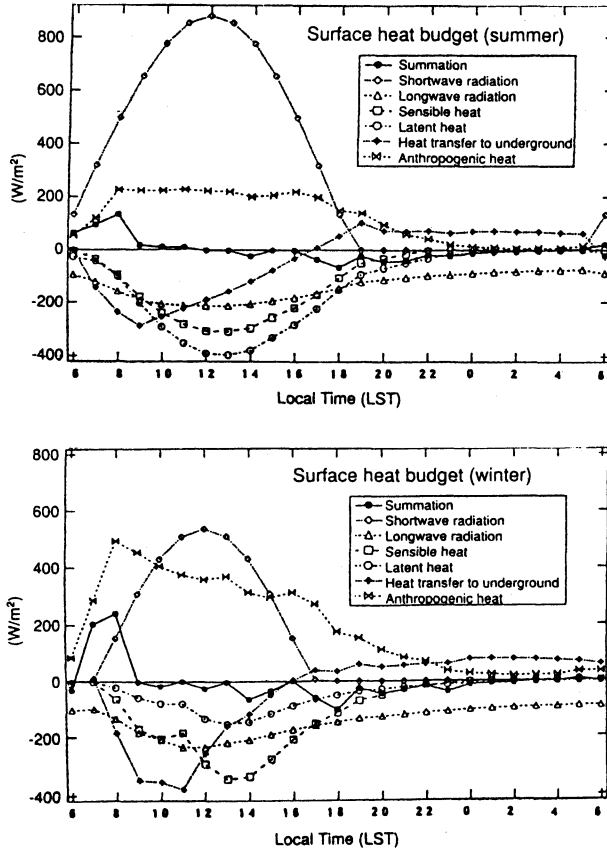
実際、夏季同様冬季も計算領域の中心付近にある地点において比較的両者が一致している(第10図)。午前中は両者がほぼ一致しているものの、人工排熱が多いためか18時から20時にかけての低下が鈍く、夜間は実測気温と大きくかけ離れる。24時以降は急激に冷え、明け方には実測気温を下回る。一方実測気温は夜半以降あまり低下しない。また、一般的な傾向としては、計算気温の最高気温は実測気温のそれよりも遅く出現している。

## 5. 都市構造及び人間活動のインパクト評価

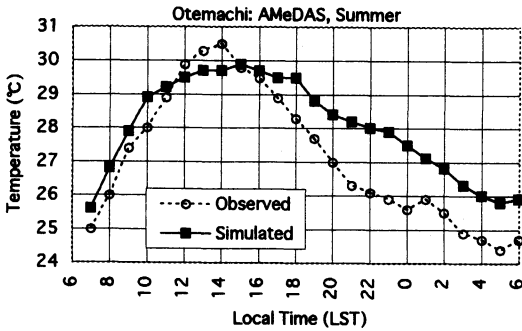
### 5.1 人工排熱と地表面被覆の寄与

人工排熱をファクターとした解析を行うに当たり、シナリオの影響を評価するための対象地点を選択した。計算気温が実測気温に近いことを基準とし、計算領域の中心付近から大手町(夏季)と新宿(冬季)の

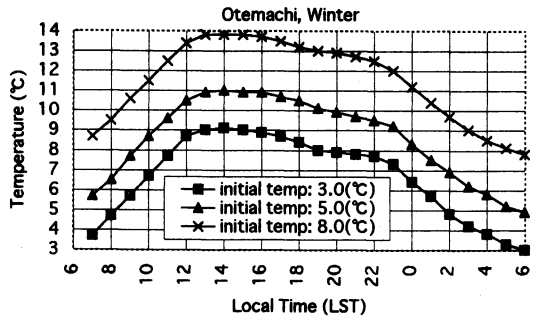




第7図 大手町における地表面熱収支.



第8図 大手町における実測気温と計算気温の日変化 (夏季の例).

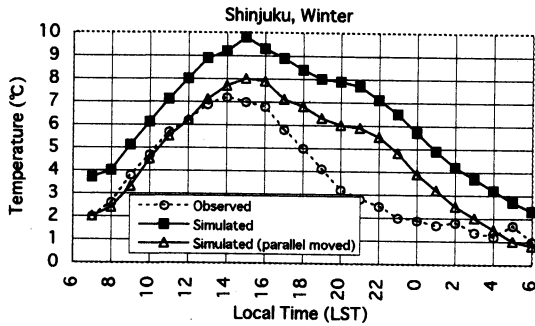


第9図 計算気温の初期値に対する感度.

2地点が選択された。ヒートアイランドに対する人工排熱と地表面被覆の寄与を調べるため、第3表に示す条件の下で計算気温の比較を行った(第11図)。

夏季の日中はCase 1(現状)とCase 2(人工排熱をなくした場合)の差は小さいが、夕方から夜間にかけてその差は急速に拡大する。この差は人工排熱の多い

ところほど大きく、大手町で22時に最大約1.5 $^{\circ}C$ の差となっている。人工排熱のピークは日中であるが、その影響は夜間に顕著である。また明け方近くにはこの差は小さくなる。一方Case 2とCase 3(計算領域内の土地利用をすべて草原に変えた場合)の比較によれば日中徐々にその差が拡大し、終日約1 $^{\circ}C$ の差をキープす



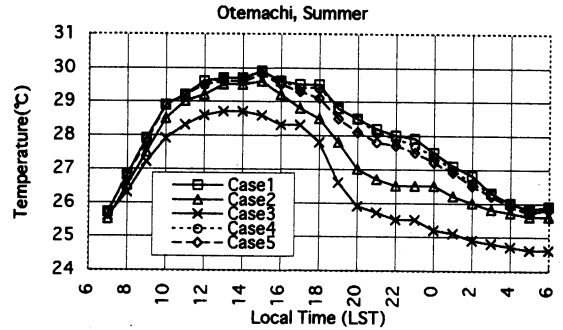
第10図 新宿における実測気温と計算気温の日変化 (冬季の例).

第3表 Case 1~Case 5 の計算条件.

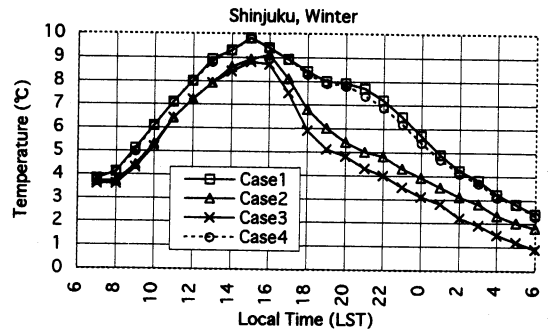
	人工排熱	地表面被覆
Case 1	あり	現状
Case 2	なし	現状
Case 3	なし	草原を仮定
Case 4	給湯の50%を削減	現状
Case 5	給湯の50%及び冷房の100%を削減	現状

る。人工排熱の場合と異なり、地表面被覆の場合は昇温過程において気温に対する顕著な差が現れる。大手町における地表面熱収支を比較すると、Case 1(第7図参照)はCase 2(第12図)に比べ日中の顕熱と潜熱が大きいのに対し、正味の長波放射にはほとんど差が見られない。人工排熱は主に顕熱や潜熱の形で大気中に放出されていることが熱フラックスの量的な比較からもうかがえる。また、Case 2はCase 1に比べ地中熱伝導の向きが逆転する時間帯が1時間ほど早い。

冬季は夏季と異なり、終日Case 1がCase 2を大きく上回る。とりわけ夕方から夜半にかけてその差は大きく、22時に最大約2.5°Cに達している。またCase 2とCase 3との間には日中差が見られず、夕方から明け方にかけて約1°Cの差がキープされるのみである。大手町における地表面熱収支については、Case 1(第7図参照)では顕熱と潜熱が人工排熱の日変化を反映したカーブを示しているのに対し、Case 2(第12図)ではともに小さなものとなっている。さらにCase 2における顕熱、潜熱や正味の長波放射のピークはCase 1よりも1時間ほど遅く、地中熱伝導の向きが逆転する時間帯は1時間ほど早い。Case 1では日没後もしばらく50~100 W/m<sup>2</sup>前後の顕熱が放出されており、これが冬季夜間におけるヒートアイランドの一因であると考えられる。



第11図 計算気温の日変化の比較。各Caseの条件を第3表に示す。



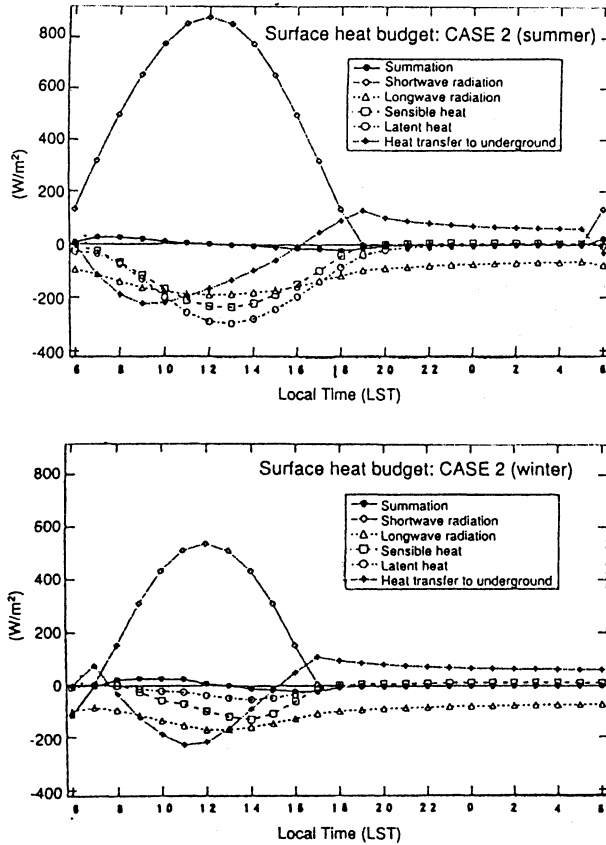
第11図 計算気温の日変化の比較。各Caseの条件を第3表に示す。

以上より、夏季は短波放射が強く人工排熱の影響は相対的に小さいが、冬季は短波放射が弱く人工排熱の影響が相対的に大きいことがうかがえる。

## 5.2 地域暖冷房導入シナリオによる比較

東京23区全体の年平均のエネルギー消費に対しては、自動車交通が25%、家電・OA機器等の動力が19%、給湯が18%、暖房が16%を占めている。冷房のシェアは3%に過ぎない(一ノ瀬ほか, 1994)。人工排熱はやみくもに減らせるようなものではなく、省エネルギーの技術的裏付けにもとづくシナリオによるシミュレーションを行うべきである。

地域暖冷房の導入等により、熱需要に対するエネルギー消費を削減することが可能である。例えば家庭やオフィスでガスにより給湯する場合、その熱効率は低く、必要以上に室内等に熱を放出してしまう。しかし地域暖冷房等により温水を供給する場合、そうした無駄な熱は発生しないため、その分人工排熱の放出を抑制することができる。このような考え方にもとづき、仮に給湯用エネルギーの50%及び冷房用エネルギーの100%(河川水を冷熱源とした場合の冷水供給に対応)の削減が可能であった場合の効果を検討した(第3



第12図 大手町における地表面熱収支 (人工排熱なし)。

表)。

給湯用エネルギーの50%という仮定は、東京23区においては給湯に用いられた熱の約5割が下水道に排出されている(一ノ瀬ほか, 1994)ことより、給湯時に室内に放出され得る熱は高々給湯用エネルギーの50%である、という考え方にもとづいている。現状では、実際に地域暖冷房を導入し得るのはごみ焼却場や発電所など、熱源の周辺に限られている。また、下水や河川水(冷熱源)については、ごみ焼却場や発電所に比べ、熱源としての利用可能性が面的な広がりをもっているが、東京23区における現実的な地域暖冷房施設の規模や導入コスト(一ノ瀬ほか, 1997; 一ノ瀬ほか, 1996)を考慮すると、東京23区全体に地域暖冷房を普及させるというシナリオの実現性は経済的な見地から困難であると思われる。さらに、仮に全域的な普及が可能であった場合は、地域暖冷房施設そのものからの人工排熱が無視できなくなるであろう。河川水を冷熱源とした場合の河川水温の昇温効果についても検討す

る必要がある。

このような事例解析により、1つ1つのエネルギー消費活動の都市気温場に対する寄与を定量的に評価することが可能となるが、給湯と冷房の両者を併用(Case 5)した効果ですら最大で夜間の $-0.5^{\circ}\text{C}$ に過ぎず、地域暖冷房の普及による熱損失の軽減のみでは都市気候の緩和は困難である(第11図)。

## 6. 結論

エネルギー消費を通じて人間活動がどの程度ヒートアイランドに寄与しているのかを定量化し、都市の熱環境を緩和する手段としてのエネルギー消費量削減の有効性を検討するため、東京23区をフィールドとして局地気象モデルによる数値シミュレーションを行った。結論は以下のようにまとめられる。

(1) 冬季は海風が弱いため明瞭なヒートアイランドが終日現れ、周辺との気温差は最大で約 $2.6^{\circ}\text{C}$ に達した。また20時頃には人工排熱量の多い大手町、新宿、

池袋に高温の極が認められた。

(2) 都心部における人工排熱の影響は夏季に最大1.5°C、冬季に最大2.5°Cと見積もられたが、給湯用エネルギーの50%及び冷房用エネルギーの100%を削減した場合の効果は最大で-0.5°Cに過ぎなかった。

(3) 細密地理情報にもとづいて地表面境界条件の高精度化をはかることにより、人工排熱の時空間分布構造が都市の熱環境に与える影響の評価が可能である。

## 謝 辞

本研究を行うに当たり、土木学会・日本地理学会・日本気象学会等を通じて温かい御助言を頂きました方々に感謝します。東京都都市計画局並びに下水道局のスタッフには東京都土地利用現況調査のポイントサンプリングデータを、環境庁国立環境研究所及び東京都環境保全局には大気環境時間値データを、気象庁統計室にはAMeDASデータを利用させて頂いた。

また、平成4・5年度鹿島学術振興財団研究助成金「都市の熱容量・環境負荷容量と都市構造の関係に関する研究」(代表・一ノ瀬俊明)等の一部を利用させて頂いた。

## 参 考 文 献

- Anthes, R. A., E-Y. Hsie and Y-H. Kuo, 1987: Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4), National Center for Atmospheric Research, NCAR/TN-282+STR (PB87190633/AS), 66pp.
- 藤野 毅, 浅枝 隆, 和氣亜紀夫, 1994: 首都圏の夏季のヒートアイランドの形成と地衝風の関係について, 環境システム研究, 22, 280-285.
- 藤野 毅, 浅枝 隆, 和氣亜紀夫, 藤野愛子, 1993: 埼玉県南東部における温暖化機構の解析, 環境システム研究, 21, 1-6.
- 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 松尾友矩, 1994: 細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析, 環境工学研究論文集, 31, 263-273.
- 一ノ瀬俊明, 川原博満, 花木啓祐, 松尾友矩, 1996: 下水熱有効利用可能性解析ツールとしてのGISの開発, 土木学会論文集, 552/VII-1, 11-21.
- 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 伊藤武美, 松尾友矩, 川原博満, 1997: 地理情報システムとライフサイクルアセスメントの結合による地域熱供給事業の検討, 環境科学会誌, 10, 119-127.
- 河村 武, 浅井富雄, 内田英治, 1986: 気象の事典, 平凡社, 530pp.
- Kessler, R. C. and S. G. Douglas, 1992: User's Guide to the Systems Applications International Mesoscale Model (Version 2.0), Systems Applications Int., SYSAPP-92-085, 48pp.
- Kimura, F. and S. Takahashi, 1991: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment, Atmos. Environ., 25B, 155-164.
- Kondo, H., 1991: A numerical experiment of the "extended sea breeze" over the Kanto Plain, J. Meteor. Soc. Japan, 68, 419-434.
- 近藤純正, 1994: 水環境の気象学, 朝倉書店, 348pp.
- Pielke, R. A., 1974: A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, Mon. Wea. Rev., 102, 115-134.
- Pielke, R. A., 1984: Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press, 612pp.
- Therry, G. and P. Lacarrere, 1983: Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description, Bound.-Layer Meteor., 25, 68-88.
- 東京都都市計画局, 1986: 東京都土地利用現況調査事業要綱・要領.
- Ulrickson, B. L. and C. F. Mass, 1990: Numerical investigation of mesoscale circulations over the Los Angeles basin. Part I, A verification study, Mon. Wea. Rev., 118, 2138-2161.
- 山添 謙, 一ノ瀬俊明, 1994: 東京及びその周辺地域における秋季夜間の晴天時と曇天時のヒートアイランド, 地理学評論, 67A, 551-560.

## Upgrade of Surface Boundary Condition for Numerical Simulation of Urban Climate Based on Very Precise Geographic Information

Toshiaki Ichinose\*<sup>1</sup>, Kazuhiro Shimodozono\*<sup>2</sup>,  
Itsushi Uno\*<sup>3</sup> and Keisuke Hanaki\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> (Corresponding author) Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo (Present affiliation: Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies), Tokyo 153, Japan.

\*<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Tokyo (Present affiliation: Tokyo Marine and Fire Insurance Co. Ltd).

\*<sup>3</sup> Atmospheric Environment Division, National Institute for Environmental Studies.

\*<sup>4</sup> Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo.

(Received 8 January 1996; Accepted 14 July 1997)



### とうきゅう環境浄化財団の研究助成募集

#### 1. 研究対象者:

学識経験者の方はもちろん、一般の方でも研究に意欲のある方であれば、どなたでもご応募いただけます。

#### 2. 研究対象テーマ:

- (1) 産業活動または住生活と多摩川およびその流域との関係に関する調査および試験研究
- (2) 排水・廃棄物等による多摩川の汚染の防除に関する調査および試験研究
- (3) 多摩川およびその流域における水の利用

に関する調査、試験研究

- (4) 多摩川をめぐる自然環境の保全、回復に関する調査、試験研究

#### 3. 公募締切日:平成10年1月16日

応募についての詳細は、下記財団事務局へお問い合わせ下さい。

〒150 東京都渋谷区渋谷1丁目16番14号

渋谷地下鉄ビル

財団法人 とうきゅう環境浄化財団

TEL: 03-3400-9142