

## ■ 研究論文 ■

# 関東圏における三次元数値解析モデルを用いたヒートアイランド現象の分析とその緩和策の研究

A Study on Mitigation Measures of Heat Island in Kanto Area by Three-dimensional Numerical Simulation of Thermal Environment

古川道信\*・川崎智央\*・石谷久\*\*\*\*・松橋隆治\*\*\*\*\*

Michinobu Furukawa Tomohiro Kawasaki Hisashi Ishitani Ryuji Matuhashi

吉田好邦\*\*・六川修一\*\*\*・間宮敦\*

Yoshikuni Yoshida Shuichi Rokugawa Atsushi Mamiya

(原稿受付日1999年2月24日, 受理日1999年8月11日)

## Abstract

Since the beginning of the 20th century, the industry has been developed and lots of people have been getting together in large cities. As a result, large cities have special climate. In particular, heat island that is phenomenon of the high temperature in the large city has been thought important.

But a specific methodology is necessary to analyze heat island and to estimate each plan. In this paper, a three-dimensional numerical model for the simulation of urban heat islands is developed, and it is applied to Kanto area. We analyze the actual condition of heat environment and estimate each plan of heat island mitigation. Simulated results of standard case coincide with actual data very well. The effect of improving the thermal environment is simulated in the following four cases; 1) Decrease the artificial heat by energy conservation, 2) Decrease the heat capacity of buildings, 3) Increase the vaporization of highway, 4) Increase the albedo of buildings.

Changes of air temperature are evaluated, comparing the improved cases with the standard case using this model. In conclusion, we clarify advantages and disadvantages of the investigated mitigation measures.

## 1. はじめに

近年の急速な産業と経済の発達に呼応して、都市への人口と産業の集中による人間の生産及び消費活動の促進は、都市特有の気候を発生させるに至った。中でもエネルギー問題と関わりが深い都市の温暖化問題である「ヒートアイランド現象」に代表される熱環境の変化が特に注目されている。夏場の冷房需要は年々増加しており、電力供給側にとって大都市圏の需要を満たすことはかなりの負担となっている。何らかの対策を施すことでヒートアイランド現象が緩和できるなら、電力のピークカット効果と省エネルギー効果が期待できるであろう。しかし有効な改善方策を検討していくためには、ヒートアイランド現象を定量的に分析し、

諸方策の改善効果を評価できる数値解析手法が必要となってくる。また、ヒートアイランド現象のモデル分析はこれまで数多くなされているが、包括的なヒートアイランド対策をシミュレーションと連結・評価した例は極めて少ない。そこで、本論文では関東圏を例にコンピューターによる三次元熱環境シミュレーションモデルを開発し、諸方策の改善効果を定量的に評価した。

## 2. 三次元熱環境シミュレーションモデルの概要

### 2.1 熱環境シミュレーションモデルの構成

本研究で構築したモデルは都市部を中心とした局地的な気象現象をシミュレーションするものであり、図1に示した各部分を考慮し、以下の3つのサブモデルから構成される。

①風速場及び大気中での熱・水蒸気の三次元移流拡散モデル、②地表面及び海表面での熱収支モデル、③地中及び海中での熱拡散モデル

\* 東京大学大学院工学系研究科大学院生

\*\* " " 助手

\*\*\* " " 助教授

\*\*\*\* " " 地球システム工学専攻教授

\*\*\*\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻助教授

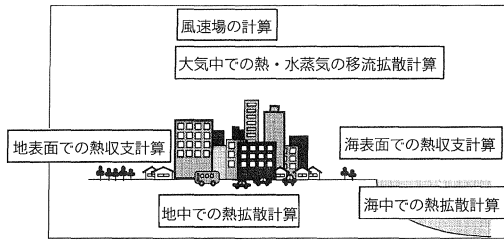


図1 モデル対象領域の概念図

2.2 三次元移流拡散モデル

(1) 基礎方程式

このモデルは式(1)から(6)の基礎方程式から構成される<sup>1)</sup>。

<質量保存則>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

<運動方程式>

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \\ &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + fv \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \\ &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} \\ &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \frac{\theta}{\Theta} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

<エネルギー方程式>

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u}{\partial x} + \frac{\partial \theta v}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vh} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q_A}{c_p \rho} \end{aligned} \tag{5}$$

<水蒸気輸送方程式>

$$\begin{aligned} &\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} + \frac{\partial qw}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{Vh} \frac{\partial q}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

$x$ : 東西方向,  $y$ : 南北方向,  $z$ : 鉛直方向,  $u, v, w$ : 流速,  $t$ : 時間,  $\theta$ : 温位  $\theta = T(P_0/P)^{R/c_p}$ ,  $T$ : 気温,  $P$ : 気圧,  $P_0$ : 基準気圧,  $R$ : 大気的气体定数,  $C_p$ :

大気の比熱,  $q$ : 水蒸気量,  $\rho$ : 大気密度,  $\Theta$ : 平均温位,  $g$ : 重力定数,  $f$ : コリオリパラメータ,  $Q_A$ : 単位体積あたりの生成熱,  $K_{Hm}$ : 水平乱流粘性係数,  $K_{Vm}$ : 鉛直乱流粘性係数,  $K_{Hh}$ : 熱・水蒸気の水平乱流拡散係数,  $K_{Vh}$ : 熱・水蒸気の鉛直乱流拡散係数

(2) 乱流粘性・乱流拡散係数

鉛直方向の乱流粘性・乱流拡散係数については、以下のように設定<sup>1)</sup>する。

(イ) 接地境界層 ( $z=100$  [m] 以下)

$$\begin{aligned} K_{Vm} &= \left( \frac{\kappa z}{\phi_m} \right)^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| \\ K_{Vh} &= K_{Vm} \frac{\phi_m}{\phi_h} \end{aligned} \tag{7}$$

$\phi_m$ : 運動量の乱流普遍関数,  $\kappa$ : カルマン定数,  $\phi_h$ : 熱の乱流普遍関数

乱流普遍関数は、リチャードソン数  $Ri$  (式(8)) の関数として式(9)のように表わされる。

$$Ri = g \left( \frac{d\theta}{dz} \right) / \theta \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_h = 1 + (10Ri)^2 \quad Ri \geq 0 \\ \phi_m &= (1 - 16Ri)^{-1/4} \\ \phi_h &= (1 - 128Ri)^{-1/4} \quad Ri < 0 \end{aligned} \tag{9}$$

(ロ) エクマン層 ( $z=100$  [m] 以上)

エクマン層とは地表上の熱的・力学的影響を受ける範囲の大気層のことである。ここでは鉛直方向の乱流粘性・乱流拡散係数は式(10)のように表わす。

$$\begin{aligned} K_{Vm} = K_{Vh} &= l^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| (1 + 3Ri)^{-1} \quad Ri \geq 0 \\ &= l^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| (1 + 3Ri) \quad Ri < 0 \end{aligned} \tag{10}$$

$$l = \frac{\kappa z}{1 + \kappa z / l_0}, \quad l_0 = 100 \text{ [m]} \tag{11}$$

ただし、モデル中では係数が現実的な値になるよう式(12)のような制約条件をかけている。

$$0.1 \leq K_{Vm} \leq 100 \text{ [m}^2/\text{s]} \tag{12}$$

また、水平方向の乱流粘性・乱流拡散係数については以下の式(13)のように設定する。

$$\left. \begin{aligned} K_{Hm}^x &= C_4 \Delta x^2 \left| u_{i+1,j,k} + u_{i-1,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i,j-1,k} - 4u_{i,j,k} \right| \\ K_{Hm}^y &= C_4 \Delta y^2 \left| v_{i+1,j,k} + v_{i-1,j,k} + v_{i,j+1,k} + v_{i,j-1,k} - 4v_{i,j,k} \right| \\ K_{Hh} &= C_4 \Delta x \Delta y \left| \theta_{i+1,j,k} + \theta_{i-1,j,k} + \theta_{i,j+1,k} + \theta_{i,j-1,k} - 4\theta_{i,j,k} \right| \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

ここで、 $C_4 = 0.001 \Delta x$ ,  $\Delta y$ : 格子幅である。

$x, y$ の添字は $x, y$ 方向の値を示し,  $i, j$ はそれぞれ $x, y$ 方向の格子位置を表わす。

ただし, 計算安定化のため, モデル中では係数に式(14)のような制約条件をかけている。

$$\left. \begin{aligned} 0.1C_4\Delta x^2 \leq K_{Hm}^x \leq C_4\Delta x^2 \\ 0.1C_4\Delta y^2 \leq K_{Hm}^y \leq C_4\Delta y^2 \\ K_{Hm} \leq C_4\Delta x\Delta y \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

### (3) 境界条件

本モデルでは境界条件を以下のように設定した。

(イ) 地表面境界 ( $z=0$  [m])

$$\text{風速: } u=v=w=0 \quad (15)$$

気温: 地表面熱収支式で算出

水蒸気量: 地表面温度の飽和水蒸気量×蒸発効率

(ロ) 上部境界 ( $z=2000$  [m])

$$\text{風速: } \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad w=0 \quad (16)$$

$$\text{気温: } \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

$$\text{水蒸気量: } \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

(ハ) 側面境界 ( $x=0,80$  [km],  $y=0,60$  [km])

$$\text{風速: 東西方向 } \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

$$\text{南北方向 } \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

$$\text{気温: } \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

$$\text{水蒸気量: } \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (22)$$

## 2.3 地表面(海表面)熱収支モデル

地表面での熱収支はその直上での大気状態に影響を与える。本研究では以下に示すような地表面熱収支モデルを用いて地表面温度を求め, それを三次元大気モデルの下部条件として与えている。地表面における熱

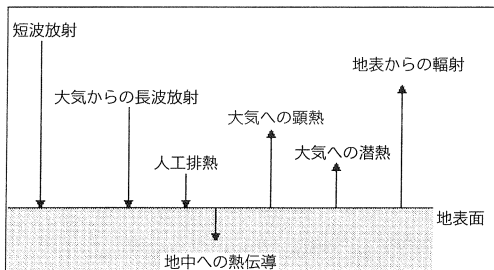


図2 地表面熱収支項目を示した模式図

の流入・流出を表した模式図を図2に示す。地表面での熱バランスが取れているものと仮定すると, 地表面熱収支式は式(23)のようになる<sup>1)</sup>。

$$C_t \frac{\partial T_G}{\partial t} = R + A - H - lE - G \quad (23)$$

$C_t$ : 地表面熱容量,  $T_G$ : 地表面温度,  $R$ : 太陽からの正味入力放射量,  $A$ : 人工廃熱,  $H$ : 顕熱フラックス,  $lE$ : 潜熱フラックス,  $G$ : 地中への熱伝導フラックス

右辺の各項については以下のようにして求められる<sup>1)</sup>。

(1) 太陽からの正味入力放射量:  $R$

$$R = R_s + R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (24)$$

$R_s$ : 太陽からの短波放射,  $R_L \downarrow$ : 大気からの長波放射,  $R_L \uparrow$ : 地表面からの長波放射

(イ) 太陽からの短波放射

$$R_s = (1 - \alpha) A^m R_0 \cos Z \quad (25)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma \quad (26)$$

$\alpha$ : アルベド,  $A$ : 大気透過率,  $m$ : 天長距離,  $R_0$ : 太陽常数,  $Z$ : 太陽天長角,  $\phi$ : 緯度,  $\delta$ : 太陽赤緯,  $\gamma$ : 時角

(ロ) 大気からの長波放射

大気からの長波放射は地上から大気上層までの各部分の寄与の総和であるが, 上方の影響は指数関数的に弱くなる。このため平均気温の黒体放射と全有効水蒸気量を用いて近似的に求めている。

$$R_L \downarrow = (0.73 + 0.2\chi + 0.06\chi^4) \sigma T_z^4 \quad (27)$$

$$\chi = \log_{10} \omega \quad (28)$$

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数,  $T_z$ : 下層大気の平均気温,  $\omega$ : 全有効水蒸気量

(ハ) 地表面からの長波放射

$$R_L \uparrow = \varepsilon \sigma T_G^4 \quad (29)$$

$\varepsilon$ : 射出率

(2) 大気への顕熱フラックス:  $H$

$$H = -\rho c_p K_{vh} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (30)$$

$\rho$ : 大気密度,  $c_p$ : 大気比熱,

$K_{vh}$ : 熱の乱流拡散係数

(3) 大気への潜熱フラックス:  $lE$

$$lE = -\rho L K_{vq} \beta \frac{\partial q}{\partial z} \quad (31)$$

$L$ : 気化熱量,  $\beta$ : 蒸発効率,

$K_{vq}$  ( $=K_{vh}$ ): 水蒸気乱流拡散係数

(4) 地中への熱伝導フラックス:  $G$

$$G = k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (32)$$

$k_s$ : 土壌の熱伝導率,  $T_s$ : 土壌温度

### 2.4 地中(海中)一次元熱拡散モデル

土壌内の熱拡散は鉛直方向熱伝導が卓越している。そこで本研究では地中内熱伝導については鉛直方向のみの一次元熱拡散モデルを用いた。海中の場合は海流による熱拡散が存在するが、地中内と同じモデルを用いており、この点の改良は今後の課題とする。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left( \frac{k_s}{\rho_s C_s} \frac{\partial T_s}{\partial z_s} \right) \quad (33)$$

$\rho_s$ : 土壌密度,  $C_s$ : 土壌熱容量,  $k_s$ : 熱伝導率

## 3. 関東圏における熱環境シミュレーション

本研究で構築したモデルを用いて、関東圏を対象領域に熱環境シミュレーションを実施した。

### 3.1 計算対象領域

本研究では、図3に示すように東京を中心とした、東西80km、南北60km、鉛直方向2kmの領域(メッ

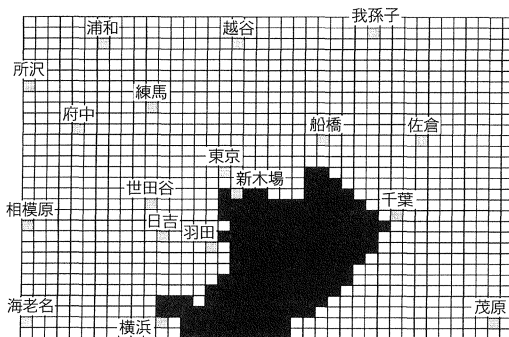


図3 計算対象領域(水平方向)

シュ数 $40 \times 30 \times 20$ )を計算対象領域とする。また地下方向には深さ4m、海中は2m(メッシュ数 $40 \times 30 \times 10$ )の領域を設定した。これは温度の日変化がほぼ及ばない深さである<sup>1)</sup>。

### 3.2 計算条件

ヒートアイランド現象は、夏の典型日(風が弱く、日中・夜間ともに晴天の日)に顕在化しやすい。そこで計算対象時期には日射条件を計算開始する日時を8月1日午前0時に設定し、上記の気象条件が成り立っているとした。また、計算の初期条件は表1のように設定している。

### 3.3 パラメータの設定と人工廃熱条件

地表面熱収支式で用いる各物性値(土壌熱伝導率、土壌熱容量、地表面熱容量、アルベド、蒸発効率、射

表1 計算初期条件

計算初期条件			
日 時	8月1日		
X方向風速	0.0 [m/s]	海中表面温度	27.85 [°C]
Y方向風速	0.0 [m/s]	水蒸気量	0.0173 [kg/m <sup>3</sup> ]
Z方向風速	0.0 [m/s]	大気圧力	101325 [Pa]
大気温度	27.85 [°C]	参照緯度	35.0 [°]
土壌表面温度	27.85 [°C]	参照経度	139.0 [°]

表2 計算領域内の土地利用割合

計算領域内の土地利用割合					
用途	全体	東京	浦和	千葉	横浜
田	10.9	0.0	1.2	0.0	0.0
畑	9.9	0.0	26.4	0.0	0.0
果樹園	0.6	0.0	0.4	0.0	0.0
果樹園2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
森林	11.3	0.0	0.5	0.4	4.7
荒地	2.2	0.0	0.0	0.0	0.5
建物	33.7	68.9	67.4	78.3	79.2
幹線	2.1	19.1	1.5	8.9	8.2
その他	10.3	2.1	2.7	8.9	5.6
内水地	4.2	9.9	0.0	1.9	0.0
海浜	13.6	0.0	0.0	1.7	1.8
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00

表3 土地利用毎の地表面物性値

土地利用毎の地表面物性値							
用途	土壌熱伝導率 [W/mK]	土壌熱容量 [kJ/m <sup>3</sup> K]	地表面熱容量 [J/m <sup>2</sup> K]	アルベド	蒸発効率	射出率	粗度長 [m]
田	1.0878	1940	83680	0.12	0.1	0.88	0.01
畑	1.0878	1940	83680	0.25	0.05	0.75	0.05
果樹園	1.0878	1940	83680	0.15	0.05	0.85	0.05
果樹園2	1.0878	1940	83680	0.15	0.05	0.85	0.05
森林	1.0878	1940	209200	0.12	0.1	0.88	0.4
荒地	1.0878	1940	83680	0.25	0.05	0.75	0.05
建物	2.1757	1940	418400	0.3	0.02	0.7	0.05
幹線	2.1757	1940	418400	0.3	0	0.7	0.05
その他	1.0878	1940	418400	0.25	0.02	0.75	0.05
内水地	1.0878	4184	41840	0.12	0.5	0.88	0.01
海浜	1.0878	4184	41840	0.12	0.5	0.88	0.01

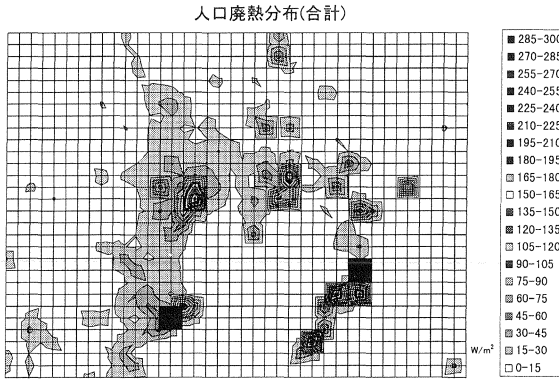


図4 人工廃熱分布(全部門合計)

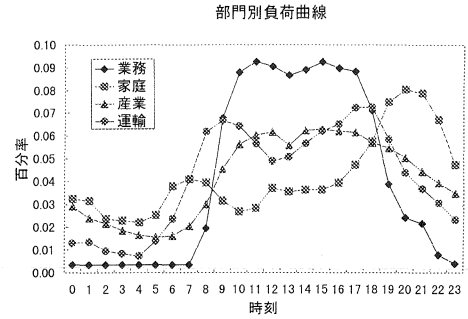


図5 部門別負荷曲線

出率、粗度長)を求めるため、国土数値情報土地利用区分データ(田・畑・果樹園・その他の樹木畑・森林・荒地・建物用地・幹線道路・その他の用地・内水地・海浜)を用いた、計算領域内の土地利用割合を表2に、土地利用毎の地表面物性値を表3に示す。原データは三次メッシュコードで区分されており(約1×1km)、これを本モデルで用いている2×2kmのメッシュにまとめ、その利用面積割合をもとに加重平均して、メッシュ毎の物性値を算出した。

一方、人工廃熱条件については、文献4)5)を参考に家庭・業務・産業・運輸の4部門について、図4、5のような廃熱マップ・負荷曲線を作成した。廃熱マップで得られた廃熱量は1日合計の値であるため、部門毎の負荷曲線により特別に変換する必要がある。

### 3.4 計算結果、及び実データとの比較

以後の計算結果は本モデルがほぼ3日目で定常的な周期変化状態に達することから、計算開始から3日目における24時間のデータを用いることにした。まず、標準入力データを用いた場合の結果と、気象庁の実測データとを比較してみた。図6は計算領域内の温度平

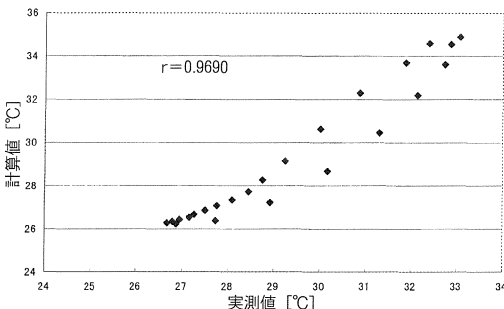


図6 シミュレーション結果と実測値との比較

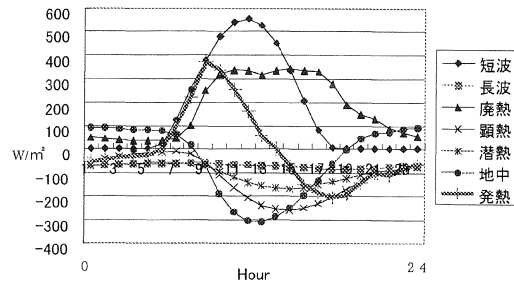


図7 東京における熱収支項目

均値と、気象庁年報による実測温度の8月快晴日平均との比較である。温度の絶対値にやらずれが見られるものの、シミュレーションと実測データとの相関係数rは0.969と良好な結果が得られた。

また、東京(大手町、座標(17, 15)地点)での熱収支項目を図7に示した。太線は各項目の合計であり、+が熱流入、-が熱流出を表している。

熱流入項目として一番大きいのが太陽からの短波入射であり、人工廃熱も都心のピーク時には大きな割合を占めることがわかる。また流出項目としては地中・海中への熱伝導が大きいのが夜間には逆に熱が流入している。長波放射・顕熱・潜熱はほぼ同じ割合を占めるが、顕熱がやや大きいことがわかる。

## 4. ヒートアイランド緩和策の効果

ここでは4つのヒートアイランド緩和策の効果を検討する。評価の方法として、標準入力データより得られたデータとの温度差を、大手町(東京駅を含む)メッシュ座標(17, 15)地点、及び領域全体の2つで日変化をとることとする。

### 4.1 省エネルギーによる人工廃熱削減策

まず省エネルギー対策により人工廃熱が削減された場合の計算を行った。各部門の人工廃熱については3

表4 熱負荷項目

熱負荷項目		
室負荷	外周負荷	外壁貫流負荷
		等価日射負荷
窓貫流負荷		
隙間風負荷		
内部負荷		人体負荷
	照明負荷	
		機器負荷

章で述べたが、ここでは文献7)と著者らによる文献8), 9), 10), 11)を参考に各部門の削減率を推定した。以下に各部門毎の推定方法を示す。

#### (1) 家庭部門・業務部門

まず家庭・業務部門については、応答係数法による熱負荷算出シミュレーションモデル<sup>6)</sup>より、表4に示した各項目の熱負荷が省エネ対策によってどの程度削減されるかを求めた。

このモデルにより、家庭部門では、省エネ技術として内断熱化・二重ガラス窓を導入することで1世帯あたりの平均エネルギー消費量を22351(kcal/日)から19480(kcal/日)まで削減することができると評価された(省エネルギー率12.8%)。また業務部門では文献8)で考慮されている省エネ技術を導入することで業務ビル述べ床単位面積当たりエネルギー消費量は1063(kcal/日)から593(kcal/日)に削減することができると評価された(省エネルギー率44.3%)。

#### (2) 産業部門

産業部門については、まず発電プラントに関しては現状から全てACC(アドバンストコンバインドサイクル)に変換した場合に発電効率を39.1%から49.7%まで改善できる<sup>7)</sup>として計算を行った。また一般の産業部門に関しては、我が国の工業炉施設の実態調査をもとに、高性能工業炉の導入による効率改善の効果を評価している。文献10)の分析によると、高性能工業炉の導入と産業用ボイラの効率改善により、産業部門全体の平均値として、9.5%の廃熱削減が行えるものと評価された。

#### (3) 運輸部門

運輸部門の廃熱削減量に関しては、文献9)の交通流・環境評価モデルより削減可能性を求めた。このモデルを用いて、電気自動車の導入による廃熱削減効果の評価したところ、現状のすべての自動車を電気自動車にした場合、平均63%の廃熱削減が可能であるとの結果を得た。

#### (4) 総合効果

本研究の省エネルギーケースでは、上記の評価結果

表5 各部門別廃熱削減率

	削減率(%)
家庭部門	12.8
業務部門	44.3
産業部門	9.5
運輸部門	63.0

を家庭、業務、産業、運輸の各部門にあてはめ、表5のように排熱を一律削減できるものとした。

この前提は、上記対策導入のための経済的・制度的障壁を考えると過大評価といわざるを得ない。しかし、ここでは省エネルギーのヒートアイランド現象に及ぼす効果の上限を評価するため、あえて上のような前提条件をおいた。

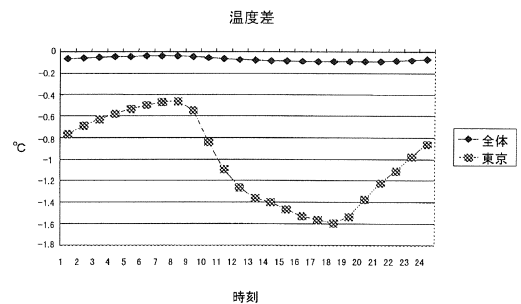


図8 省エネ対策ケースの温度差

この省エネルギーケースの、標準ケースとの温度差評価結果を図8に示す。人工廃熱の影響は都心部(東京)では非常に大きい、全体で見ると小さい。そのため都心部での温度低下は顕著に表れているが、評価地域全体で見ると温度差はほとんど見られない。

だが夏期に冷房エネルギーを大量に消費しているのは都心部であるため、都心部の温度が下がることはそのまま冷房エネルギー消費の削減・電力のピークカットにつながるという効果は期待できる。

#### 4.2 地表面熱容量削減策

建築物の材質変更や断熱化により、熱容量を削減し

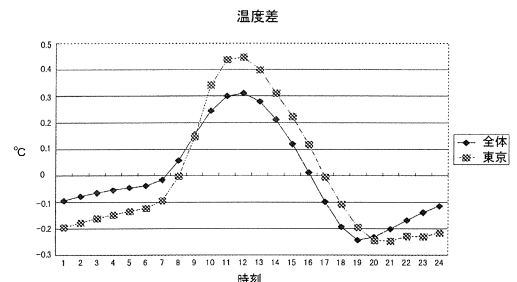


図9 熱容量削減ケースの温度差

た場合の計算を行った。建物の外断熱化による熱容量の変化については文献11)を参考に設定し、建物用途の地表面熱容量を2割削減できるものとした。標準ケースとの温度差を図9に示す。都心部の夜間に見られる熱帯夜現象は、建築物に吸収された熱が夜間放出されることも原因の一つといわれてきた。熱容量を削減したことで夜間の温度が低下しているが、日中の温度は逆に上昇している。また、都心部と全体との差はあまりない。熱帯夜対策には良いが、一日平均で見ると効果は顕著ではない。ただし外断熱には省エネ効果も含まれているので、エネルギー対策全体としてみれば無駄ではないと考えられる。

#### 4.3 水散布による潜熱輸送増加策

道路表面に水を散布する、あるいは透水性舗装にすることで蒸発効率を上げ、潜熱輸送を増加させた場合の計算を行った。地表面パラメータのうち幹線道路用途の蒸発効率 $\beta$ を土地利用区分の田と同じ0.1に設定した。標準ケースとの温度差を図10に示す。

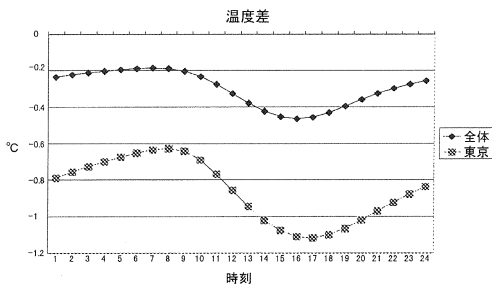


図10 潜熱輸送増加策ケースの温度差

水は熱容量が非常に大きい物質であるため、蒸発により地表面から奪われる熱量も大きく、ほぼ一日中平均して温度が低下している。ただし現実として一日中道路の表面を覆うだけの水量を確保するのは難しい。雨水などの利用等もあわせて考える必要がある。本研究で用いたモデルでは水蒸気の雲への変化まではシミュレートできないためその効果を試算することはできないが、蒸発して大気中に移動した水は、やがて雨となって地表を冷やすことになると思われる。水を媒体とした非常に大きな熱循環を考えるならば、長期的効果を期待できる。

#### 4.4 壁面加工による短波吸収削減策

建物などの反射率(アルベド)を上げることで、太陽からの短波入射を削減した場合の計算を行った。地表面パラメータのうち、建物用途のアルベドを0.3か

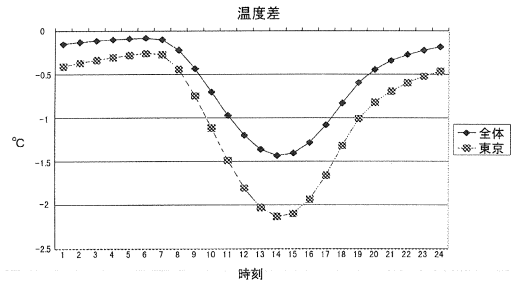


図11 アルベド変化策ケースの温度差

ら0.6に上げた。これは滑らかな壁面が白く塗装されていた場合のものである。新雪表面のアルベドは約0.9であり、加工の方法によっては様々な設定が考えられる。標準ケースとの温度差を図11に示す。

日中の温度は大きく低下している。これは日中の熱流入項目の中で最大のものが短波入射であることから当然の結果といえる。また、都心部だけでなく全体でも効果があることがわかる。具体的には壁面の塗装等による加工が考えられるが、短波入射を減らすことは、冬場の温度低下にもつながり、暖房エネルギー増加をもたらす可能性がある。また、参考までに昼間だけアルベドを上げ、夜間は逆に下げた場合の計算も行った。これは夜間の黒体放射(長波放射)による温度低下効果を狙ったものであるが、ほとんど変化は見られなかった。これは長波放射が温度の4乗に比例しているため、そちらの影響のほうが大きいと考えられる。アルベドの日変化が温度に影響ないということは、具体的な対策としては季節変化のみ考えれば良いことになる。

そのためアルベドを自由に変更できるような素材、例えば温度によって色が変化するような塗料を開発する、などが有効であると考えられる。単純にして効果が大きく、また都心以外でも効果があるという点では、有効な対策となる可能性がある。

## 5. おわりに

本研究では、大都市におけるヒートアイランド現象のシミュレーションモデルを開発し、その改善策の評価を行った。このモデルは局地的気象をシミュレートするものである。このモデルを用いて、夏場の関東圏を対象に評価を行った。その結果として得られたデータは現実の気象データと高い相関(相関係数:0.969)があることを確認できた。

次にヒートアイランド現象の緩和策として、

1) 省エネルギー対策による人工廃熱削減策

表6 ヒートアイランド緩和効果

	全体温度変化 [°C]			東京温度変化 [°C]		
	日平均	低下最大	時刻	日平均	低下最大	時刻
省エネ	-0.07	-0.09	19	-1.02	-1.59	18
熱容量削減	0.00	-0.24	19	0.00	-0.25	21
潜熱増加	-0.30	-0.46	16	-0.86	-1.12	17
アルベド増加	-0.57	-1.43	14	-0.96	-2.13	14

2) 断熱化による建築物熱容量削減策

3) 水散布による潜熱輸送増加策

4) アルベド増加による短波入射削減策

の評価を行った。本研究で考慮した対策の中には極端なケースが含まれているが、各緩和策の上限を明確にするためにこのような設定を行った。その結果として、表6に示すような温度低下が推定され、各対策の特徴を明らかにすることができた。

今後の課題として挙げられるのは、モデルの妥当性を上げることである。まず境界条件の設定において、より現実に近い条件を設定する必要がある。次に地表面パラメータの設定であるが、各土地利用用途目の地表面パラメータは計算結果に重要な影響を与えるため、実測値とよりよい相関が得られるよう実験を含めた整合性を検討していく必要がある。また、地形起伏・建築物の形状効果・壁面での乱反射・大気中の粉塵など、ヒートアイランド現象に影響を与える要因はまだ残されている。これらをモデルに組み込む必要がある。

本研究で取り扱った対策の中には、実験による確認が期待されるものがある。建物の熱容量の削減や反射率の増加はこれに当たるため、現在実験を行っており、今後さらに検討を進める予定である。

都市は長い年月をかけて構築されたものであり、本論文で検討した対策を施すには経済面、制度面で様々な障壁がある。しかしながら、ヒートアイランドの緩和は、夏期においては省エネルギー効果を生み、CO<sub>2</sub>

放出量の削減にもつながる可能性がある。したがって、都市環境のみならず、地球環境の視点からもヒートアイランド対策は重要である。本研究は、その緒に就いたばかりであるが、今後シミュレーションモデルの改良および実験の両面から、鋭意研究を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 水島雅文, 田村英寿, 丸山康樹, 角湯正剛: 名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション; 環境システム論文集, Vol. 22, 1994, 8.
- 2) Patankar, S. V. 原著, 水谷幸夫, 香月正司: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析; 森北出版, 1985.
- 3) 川又孝太郎: 熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析; 環境システム研究, Vol. 20, 1992, 8.
- 4) 民生部門における機器効率化による省電力効果; 電力中央研究所報告, 1995.
- 5) 尾島俊雄研究室: 建築の光熱水原単位 [東京編]; 早稲田大学理工総研シリーズ, 1995.
- 6) 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 川元昭吾: 空調設備の動的熱負荷計算入門; 建築設備技術者協会, 1980.
- 7) 宮本忠: コンバインドサイクル発電の現状と動向; エネルギー・資源学会 Vol. 18 No. 1, 1997, 1.
- 8) 中谷直一, 石谷久, 松橋隆治: 統合資源計画のための民生部門省エネルギー技術の評価; 第十二回エネルギーシステム経済コンファレンス, 1996.
- 9) 塚田路治, 石谷久, 松橋隆治, 小林紀, 武石哲夫: 首都圏の道路ネットワークを考慮した代替エネルギー車導入効果の分析; 第十二回エネルギーシステム経済コンファレンス, 1996.
- 10) 若林龍成, 石谷久, 松橋隆治, 田中良一, 田鍋一樹, 高島啓行: 日本の工業炉における熱効率の統計的解析とその改善によるCO<sub>2</sub>削減量の推定, 第十三回エネルギーシステム経済コンファレンス, 1997.
- 11) 古川道信: 首都圏におけるヒートアイランド現象対策の研究; 平成9年度東京大学工学部地球システム工学科卒業論文.