

## (4) 熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析

### ASSESSMENT OF THERMAL ENVIRONMENT IN TOKYO AREA USING AN ENERGY BUDGET MODEL

川又孝太郎\*, 河原 能久\*\*, 玉井 信行\*\*

Kotaro KAWAMATA\*, Yoshihisa KAWAHARA\*\*, Nobuyuki TAMAI\*\*

ABSTRACT: An energy budget model is developed to quantify the effects of the energy consumption and land cover on the surface air temperature in Tokyo metropolitan area. The model has several factors such as albedo, relative humidity, roughness height, heat capacity, and thermal diffusivity which take the values depending on the land use. The distribution and diurnal variation of anthropogenic heat release rate are given based on the limited data available.

The simulated surface air temperature by the present model agrees favorably with the two set of AMeDAS data observed in mid-summer and winter with weak general wind. The analysis of heat transport process for each land use has shown that the air temperature in urban areas increases due to the decrease in humidity, particularly in daytime. It is also shown that the increase of energy consumption enhances the air temperature level through the intensification of turbulent diffusion process.

KEYWORDS: heat island, land use, anthropogenic heat, thermal environment, heat budget model.

#### 1. はじめに

道路の舗装化やビルの高層化、緑地の減少など地表面の改変が進み、エネルギー消費が増えるにつれて、ヒートアイランド現象が顕在化してきている。都市域の気温上昇により夏期の冷房需要が拡大し、それがエネルギー消費をさらに増大させている。また、このエネルギー消費の増大が一層気温上昇を招くといった悪循環が起きている。

このような都市の気温上昇の機構を定量的に理解するためにこれまで多くのモデルが提案されている。例えば、都市境界層の熱収支に着目した鉛直方向の一次元時間変化モデル<sup>1)-3)</sup>、都市大気の局地循環を考慮した二次元モデル<sup>4)</sup>、大型コンピュータの発達にともなう三次元数値モデル、特に関東地方を対象とした数値モデル<sup>5),6)</sup>などがある。

本研究の目的は、東京圏の市街化等の開発による土地利用の変化と人工熱発生量の変化が気温に与える影響を明らかにすることである。ここでは熱収支モデルによる解析結果と AMeDAS データとの比較及びそのモデルに基づいた影響評価を行っている。

#### 2. 熱収支モデルの概要

##### 2.1 基礎方程式

本研究で使用する熱収支モデルは Myrup のモデルを改良したものである。基礎方程式は地表面におけるエネルギー収支式であり、以下のように表される<sup>3)</sup>。

$$C_s \frac{dT_0}{dt} = R_n - H - LE - S + AE \quad (1)$$

ここで、 $R_n$ : 正味の入力放射量,  $H$ : 顕熱輸送量,  $LE$ : 潜熱輸送量,  $S$ : 地中への熱伝導量,  $AE$ : 人工熱発生量である。本研究では、各熱量をそれぞれ以下のように評価している。

##### (1) 正味の放射量:

$$R_n = (1 - \alpha) A^m R_0 | \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma | - IR_n \quad (2)$$

\* 東京大学大学院土木工学専攻, Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Tokyo  
\*\* 東京大学工学部土木工学科, Department of Civil Engineering, University of Tokyo

ただし、 $\alpha$ :アルベド、 $A$ :大気中の透過率、 $m$ :天頂距離、 $R_0$ :太陽常数、 $\phi$ :緯度、 $\delta$ :赤緯、 $\gamma$ :時角である。さらに、正味の大気放射量  $IR_n$  は次のように算定している。

$$IR_n(t) = L^{\downarrow} - L^{\uparrow} = \epsilon\sigma\{273 + T_0(t)\}^4 - (0.73 + 0.2\chi + 0.06\chi^4)\sigma\theta^4 \quad (3)$$

$$\chi = \log_{10}\omega \quad (4)$$

ここで、 $L^{\downarrow}$ は地表面からの放射量、 $L^{\uparrow}$ は大気から地表面に入射する放射量、 $\sigma$ はボルツマン定数、 $\epsilon$ は放射率、 $T_0(t)$ は地表面温度である。 $L^{\uparrow}$ は地上から大気上端までの各部分の寄与の総和であるが、遠方の寄与は指数関数的に弱くなる。このために上式では  $L^{\uparrow}$ を境界層の平均的な気温  $\theta$ に相当する黒体放射  $\sigma\theta^4$ と全有効水蒸気量  $\omega$ を使って近似的に求めている<sup>7)</sup>。

(4) 顕熱輸送量:

$$H = -\frac{\rho C_p \kappa^2 U}{\ln(z/z_0)} \frac{\partial \theta}{\partial \ln z} \quad (5)$$

ただし、 $\theta$ :温位、 $\rho$ :空気の密度、 $C_p$ :空気の熱容量、 $\kappa$ :カルマン定数、 $U$ :風速、 $z$ :地表面からの距離、 $z_0$ :粗度長を表す。

(5) 潜熱輸送量:

$$LE = -\frac{\rho L \kappa^2 U}{\ln(z/z_0)} \frac{\partial q}{\partial \ln z} \quad (6)$$

(6) 地中への熱伝導量:

$$S = -k_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

地中の温度分布 ( $T$ ) は次式で示される熱伝導方程式より求める。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s C_s} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (8)$$

ここで、 $k_s$ :土の熱伝導率、 $C_s$ :土の熱容量、 $\rho_s$ :土の密度である。

大気状態は安定、中立、不安定の3つの場合に分けられる。中立の場合には、風速の対数法則が成り立つので、式(5),(6)で評価することができる。しかし、それ以外の時には対数法則は成立しない。ここでは粗い近似ではあるが、安定成層の影響を考慮するために、温位勾配が正になったとき場合に乱流拡散係数を中立時のその1/100としている。この点については現在改良中である。

このモデルでは土地利用ごとの熱的特性を粗度長  $z_0$ 、アルベド  $\alpha$ 、地表面の温度伝導率  $k_s/\rho_s C_s$ 、構造物の熱容量  $C_s$ 、相対湿度  $RH$ の5つのパラメータに集約して表現している。また、人工熱発生量の影響を熱収支式中で地表面への入熱量として直接的に評価している。

## 2.2 土地利用の分類とモデルパラメータの設定

本モデルでは土地利用を水面、裸地、草地、水田、森林、宅地の6つのカテゴリーに分ける。その6つのカテゴリーごとにその構成要素の割合に基づき地表面パラメータを決定した。その結果を表-1にまとめる。

アルベドは、文献から得た地表面構成物の個々のアルベドの値を基にして決定した<sup>3),6),8)</sup>。建築物、道路、土壌、木、草地のアルベドは、それぞれ0.40、0.12、0.16、0.18、0.20である。また、アルベドは地表面がコンクリートのみであれば大きい値となるが、ビル街のキャニオン効果によって小さい値になると考えられるため、このような地域ではアルベドを小さい値とした。

粗度長は地表面の粗さの指標であるが、その値は木村らの結果<sup>6)</sup>や環境庁の報告書<sup>8)</sup>を参考にして定めた。

本モデルでは、地表面での湿度を直接求める代わりに、高さ  $z_0$ での比湿をその高さでの温度  $T_0$ の関数であると仮定して次式で近似する。

$$q_0 = RH \cdot \{3.74 + 2.64(T_0/10)^2\} \times 10^{-3} \quad (9)$$

相対湿度  $RH$ は水蒸気圧と飽和蒸気圧の比を百分率で表したものであるが、ここでは水の蒸発散が自由に行える面積の割合と考える。したがって、植生の多い地域では高く、宅地では低い値をとる。

表 1 地表面パラメータ (夏/冬)

土地利用	アルベド	粗度長 (cm)	相対湿度	熱容量 (cal/cm <sup>2</sup> ·k)
水面	0.1/0.1	0.01	1.0/1.0	1
裸地	0.16/0.2	5	0.7/0.7	5
草地	0.2/0.25	2.5	0.9/0.7	8
水田	0.1/0.18	6.7	0.9/0.7	5
森林	0.1/0.14	42	0.9/0.9	10
宅地	0.12/0.12	188	0.05/0.05	12

熱容量は、地表面構成物の個々の値を基に、対象地域について面積平均することにより求める。地表面構成物の体積は表面積×10cmと仮定する。建築物、道路、土壌、木、草地の熱容量はそれぞれ0.48,0.45,0.52,0.46,0.46である<sup>3)</sup>。なお、水田のように、植生に関するパラメータは季節変化があるため、夏と冬でパラメータを変えた。地表面の熱容量は0.52とし、熱伝導率は宅地のみ0.0042とし、それ以外は0.0026とした<sup>6)</sup>。宅地は建蔽率によりさらに5つに細分類し、その熱容量と粗度長を変化させた(表-2)。

表 2 建蔽率によるパラメータの細分類

建蔽率 (%)	熱容量 (cal/cm <sup>2</sup> .k)	粗度長 (cm)
80 ~ 100	25	500
70 ~ 80	20	400
60 ~ 70	15	300
40 ~ 60	12.5	250
0 ~ 40	11.2	188

土地利用データおよび人工熱発生量については木村ら<sup>6)</sup>及び環境庁<sup>9)</sup>のデータを参考にして定めた。さらに、人工熱発生量の時間変化については東京電力管内時間帯別供給電力量を指標として、各メッシュに共通の変化パターンを設定した。

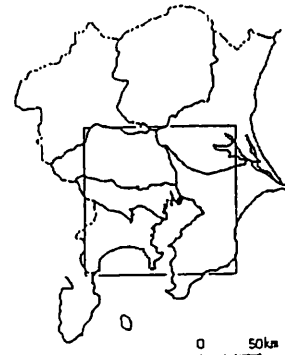


図 1 計算領域

### 2.3 混在した土地利用の取り扱い

都市化している地域の土地利用が単一であることはなく、通常多くの土地利用が混在している。その場合の地域の平均気温は、各土地利用区分ごとに求めた気温をその占有する面積比に応じた重み付き平均として算出する。

### 3. 解析対象及び計算条件

熱収支モデルの適用領域は図-1に示すように関東地方平野部である。この領域を4km×4kmのメッシュに分割し、温度の時間的、空間的变化をパーソナルコンピュータ上で算出した。熱収支モデルは接地層中の風速分布などを仮定して用いており、モデル中の諸量の算出には上空の境界での観測値が必要である。ここでは、館野の高層観測の最下層のデータを用いている。また、地中の温度分布の決定に境界条件が不可欠である。本研究では地中65cmの深さにて一定の地温を与えている。その温度は気象資料<sup>9)</sup>中の東京の測定値に基づいて定めた。

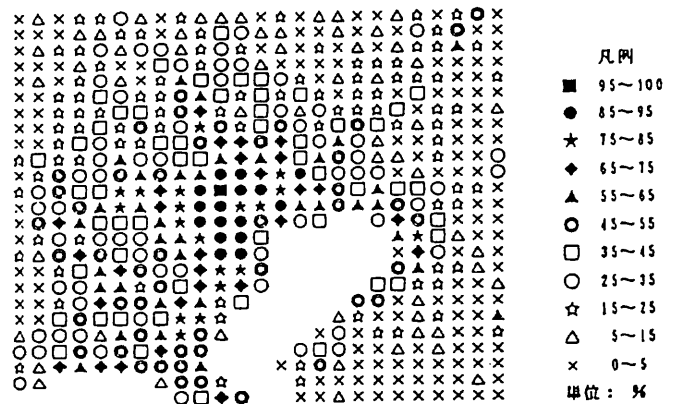


図 2 宅地の土地被覆割合

土地利用区分中の宅地に関して、そのメッシュ内の占有率を図-2に、また、人工熱発生量の分布を図-3に示す。この発生量に時間変動を表す係数をかけると各時刻でのメッシュ内の人工排熱量が求められる。

解析は季節的な影響を考慮して夏と冬について行った。解析対象日の選定については、降水量がないこと、日照が夏で9時間以上、冬で8時間以上あること、風速が夏で4.0m/s以下、冬で3.0m/s以下であることを条件として設定し、東京がこれら条件を満たす日で、さらに横浜、水戸、宇都宮、前橋の4都市のうち2都市が満たす日とした。解析での初期条件の誤差の影響を抑制するために、前述の条件を満足する日が連続する期間を選んだ。計算条件を表-3に示す。以下では1986年7月30日と1987年1月28日に対する解析結果を7月30日の結果を中心に述べる。

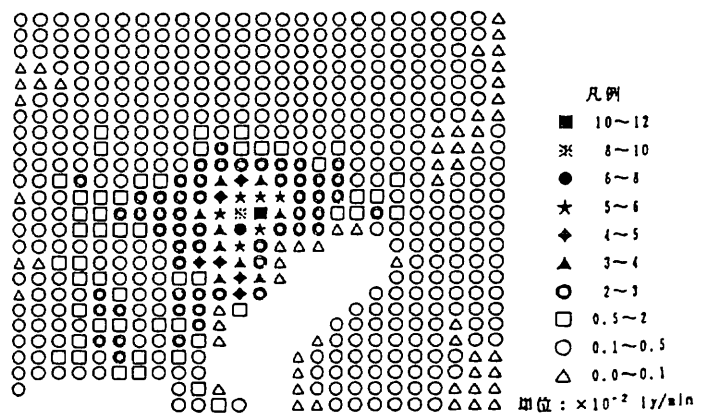


図 3 人工熱発生量(夏期)

#### 4. 計算結果及び考察

##### 4.1 モデルの妥当性の検証

熱収支モデルを用いて土地利用区分ごとの気温を求め、メッシュ内の面積比で重み付けした平均気温を算出し、関東地方平野部の気温分布図を作成した。モデルの問題点や適用性を検討するために、東京、木更津、秩父等の AMeDAS 局 14 局での観測結果との比較を行った。7月30日の毎時の気温について、モデルから得られた計算値と観測値とを対比したものが図4である。相関係数は0.86であり、本モデルが気温を良好に再現している。ただし、沿岸部では計算値の日較差が観測値よりも大きく、内陸部では逆に計算値の日較差が観測値よりも小さくなっている。このような違いが生じる理由として考えられるのは、上空および地中での境界条件の差異と海陸風の効果である。本モデルでは風による移流の効果を考えていないために、この効果を取り入れることはできない。

##### 4.2 土地利用の影響

土地利用の気温に及ぼす影響を明瞭にする目的で、人工熱発生量をゼロとしてモデル計算を行った。図5はメッシュ内の土地が単一利用に特化したときの、1日の気温の時間変化を示している。宅地の気温が1日を通して高く、宅地化が気温に与えるインパクトの大きいことがわかる。この原因を明らかにするために宅地と草地の地表面における輸送機構ごとの熱輸送量を調べた。その結果を図6、図7に示す。ただし、熱量は地表面への入力をプラスと表している。収支がゼロとなっていない分は温度の時間的変化に費やされていることを意味している。宅地では前述のように草地よりもアルベドが低いので日中の放射量はやや多くなっている。また、顕熱輸送が地表面での失熱量の半分以上を占めているが、潜熱輸送はほとんどない。一方、草地では潜熱輸送の方が顕熱輸送よりも多く、両者の関係は逆転している。地中の熱伝導率についての差異は僅かである。以上のことから、宅地化に伴う地表面の乾燥化が潜熱輸送という機構の寄与を抑制し地表面の温度を上昇させること、さらに粗度長の増加も影響して顕熱輸送量が増え気温が上昇することがわかる。宅地の熱容量が大きいことはその気温変化の位相の遅れに現れている。

##### 4.3 人工排熱の影響

人工熱の気温上昇への寄与を明らかにするために、対象地域において現状の気温の計算値と他の条件は同一とし、人工熱発生量だけをゼロとして求めた計算値との差を求めた。例として、7月30日の午前6時におけるその温度差の等値線を図8に示す。

表 3 計算条件

項目	1986年7月30日	1987年1月28日
太陽高度 (rad)	0.325	-0.321
大気の透過率	0.6	1.0
全有効水蒸気量 (cm)	2	0.1
大気の温度勾配 (deg/100m)	0.65	0.4
上空の境界高さ (m)	130	163
上空での風速 (m/s)	3.7	4.6
上空での気温 (°C)	26.0	4.7
上空での比湿	0.0169	0.00243
一定地温 (°C)	24.84	6.93
気温の初期値 (°C)	22.0	2.0

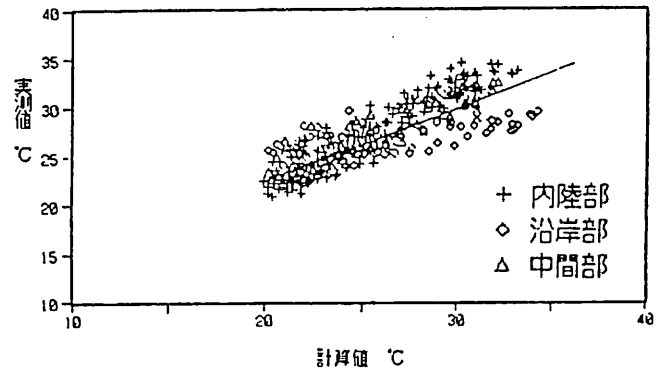


図 4 気温の計算値と実測値との相関図

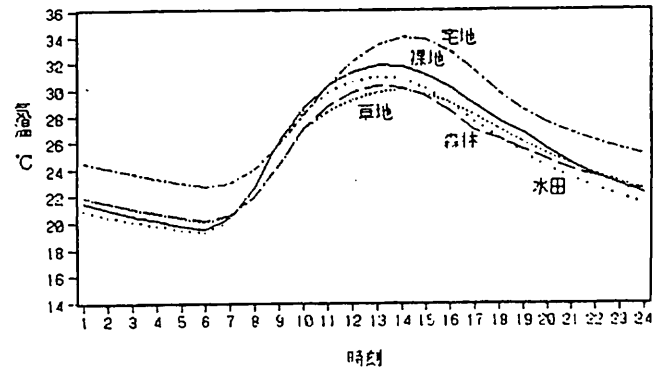


図 5 土地被覆条件の気温変化に及ぼす影響

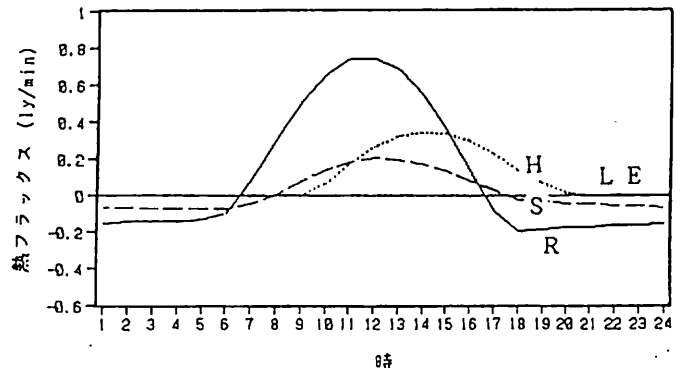


図 6 宅地の熱輸送分配量 (人工熱なし)

明け方には都心で約3°Cの昇温がみられ、その範囲も横浜、浦和付近にまで広がっているのがわかる。また、日中にはその範囲は都心に限られるが、それでも2°C程度の気温上昇が認められる。人工熱発生量の増加にともなって気温が上昇する過程を検討するために、熱輸送機構の時間的変化を調べた。図-9に人工熱発生量を加えた宅地の地表面における熱収支を示す。これを図-6と比較すると、人工熱のほとんどが顕熱輸送に変換されているために気温の顕著な上昇が起こっていることがわかる。なお、冬は夏に比べて日射量が少ないので、地表面が気温に及ぼす影響は少なくなる。

### 5. おわりに

宅地化及び人工熱発生量の増大が気温上昇に及ぼす効果を評価する第一歩として熱収支モデルを開発し、ヒートアイランドが顕在化しやすい日について東京圏を対象に解析を行った。その結果、宅地化及び人工熱発生量の増大が気温上昇に及ぼす効果を定量的に示すことができた。今後は風、熱、水蒸気の輸送を含めた三次元モデルの開発と観測結果との照合を進めていく予定である。

### 参考文献

- 1) Myrup, L.O.: J. Appl. Meteor., vol.8, 908-918, 1969.
- 2) 上野賢仁ら: 環境システム研究, vol.18, 101-106, 1990.
- 3) 瓜生良知ら: 環境システム研究, vol.19, 83-88, 1991.
- 4) Atwater, M.A.: Boundary-Layer Meteor., vol.3, 229-245, 1972.
- 5) Takano, K.: Three dimensional numerical modelling of the land and sea breezes and the urban heat island in the Kanto plain, 東京大学博士論文, 1976.
- 6) Kimura, F. and Takahashi, S.: Atmospheric Environment, vol.25B, No.2, 155-164, 1991.
- 7) 竹内清秀ら: 大気科学講座 1, 地表に近い大気, 東京大学出版会, 1981.
- 8) 環境庁企画調整局編: 首都圏その保全と創造に向けて, 1990.
- 9) 農林水産省, 気象庁共編: 農業気象資料第3号, 1982.

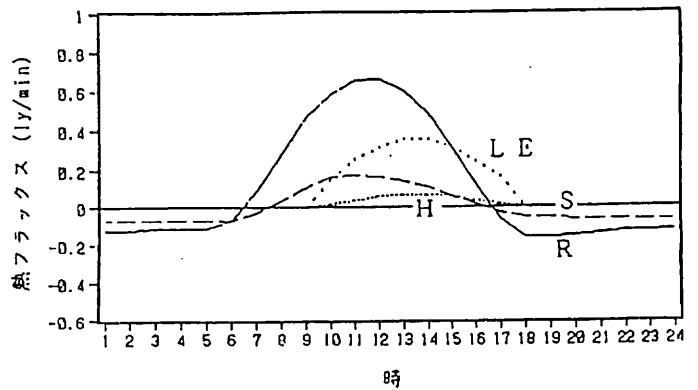


図 7 草地の熱輸送分配量

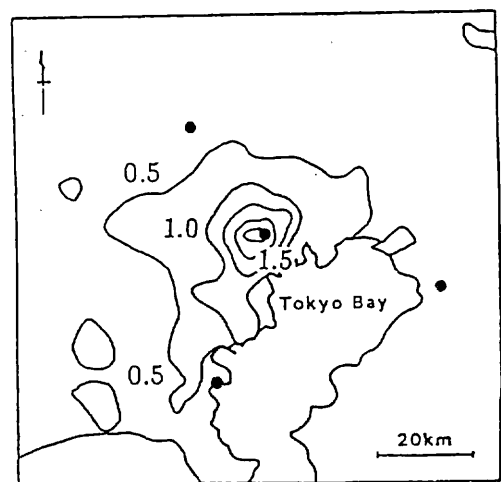


図 8 人工熱が気温上昇に及ぼす影響

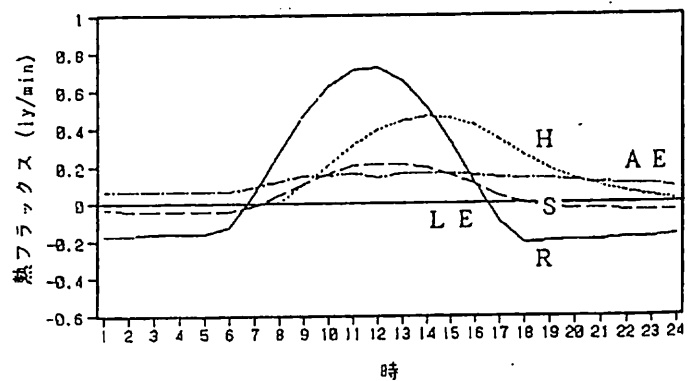


図 9 宅地の熱輸送分配量 (人工熱あり)