

(16) 都市の熱環境制御手法に関する研究

STUDY ON THE THERMAL ENVIRONMENT CONTROL OF THE CITY

上野賢仁*

永嶋聡志**

井村秀文*

楠田哲也*

Takahito UENO*, Satoshi NAGASHIMA**, Hidefumi IMURA*, Tetsuya KUSUDA*

ABSTRACT; With the development of urbanization, physical structure of urban land surface is subject to rapid changes due to expanded urbanized areas, construction of higher buildings, decreasing evaporating areas, etc. This causes geometrical and climatic changes in cities, such as the rise in average temperature, formation of heat islands and dry weather. Such mechanism is accelerated by increasing population and energy consumption in cities. In order to establish an ecologically sound city, it is imperative to study the relationship between the physical structure of the city and its thermal characteristics and thereby to establish the technical measures to control its thermal environment. The relation between the physical parameters of the surface of the earth and the urban temperature is studied by using Myrup's one-dimensional energy budget model. Then, the model is improved so as to take into account the role of the heat capacity and the net infrared flux at the surface of the earth. Thus the thermal structure of the city is expressed in terms of the roughness length, relative humidity, albedo, and heat capacity of the urban canopy. Surface temperature estimated by the model is compared with the brightness temperature obtained by remote sensing data (LANDSAT TM), and a fairly good agreement is obtained between them.

KEYWORDS; heat island, remote sensing, urban climate, thermal structure of the city, thermal environment

1. はじめに

人口や経済活動の集中とともに、都市域におけるエネルギー消費はますます高密度化し、また、高層ビル化、コンクリート化、緑地の減少など、地表面の改変が進んでいる。この結果、気温上昇、乾燥化などの都市気象の変化が生じ、これがさらに都市におけるエネルギー需要を増大させ、都市気象の変化を加速させるという悪循環が生じている。今後、都市が持続的に発展していくためには、このような都市のエネルギー構造を改善し、熱環境的に住みやすい都市をつくる必要がある。このためには、都市の物理的構造と熱環境との関係を明らかにし、都市の物理的構造の改善を通じて都市の熱環境を工学的に制御していく手法を確立することが重要である。本研究は、このような観点から、以下の解析を行うものである。

①Myrupの一次元熱収支モデル¹⁾により地表面の物理的特性と都市気温の関係を明らかにする。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

**鹿島建設

Kajima Corporation

②地表面付近の構造物の熱容量、及び地表面からの熱放射量の時間的変化を取り入れるようにMyrupモデルの改善を行う。

③モデルによって計算した地表面温度分布をリモセンTMのデータを用いて検証する。

2. 一次元熱収支モデルによる解析

2.1 Myrupのモデル

Myrup(1969)¹⁾によれば、地表面温度 T_o 、大気温度 T_a 及び地中の温度 T_s は、地表面におけるエネルギー収支式、空気・地面の熱伝導を表す方程式の組で与えられる。このモデルでは、熱環境を支配する都市構造の特性は、対象地域の相対湿度RH（水の蒸発散が自由に行える面の割合）、粗度長 Z_o （建物の高さの関数）及びアルビド α （土地の被覆状態の関数）の3つのパラメータで表される。モデルの模式図をFig. 1に示す。

$$\text{地表面におけるエネルギー収支式:} \quad R_n = H + LE + S \quad \dots(1)$$

$$\text{太陽からの正味の放射量:} \quad R_n = (1-\alpha)T_r R_o |\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos r| - IR_n \quad \dots(2)$$

温度勾配による地表面から空気中への熱の輸送量:

$$H = - \frac{\rho C_p \kappa^2 U}{\ln(Z/Z_o)} \frac{\partial \theta}{\partial \ln Z} \quad \dots(3)$$

水の気化、凝結による潜熱の輸送量:

$$LE = - \frac{\rho L \kappa^2 U}{\ln(Z/Z_o)} \frac{\partial q}{\partial \ln Z} \quad \dots(4)$$

温度勾配による地表面から土中への熱の輸送量:

$$S = - k_s \frac{\partial T}{\partial Z} \quad \dots(5)$$

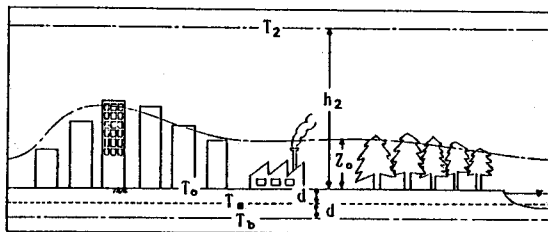


Fig. 1 モデルの模式図

地中での熱伝導方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s C_s} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad \dots(6)$$

ここに α : アルビド, T_r : 大気中の透過率, R_o : 太陽常数, ϕ : 緯度,

δ : 赤緯, γ : 時角, IR_n : 赤外線放射量, ρ : 空気の密度,

C_p : 空気の熱容量, κ : フォン・カルマン定数, U : 風速,

L : 水の潜熱量, z : 地表面からの距離, Z_o : 粗度長,

k_s : 土の熱伝導率, C_s : 土の熱容量, ρ_s : 土の密度

なお、地表面付近の比湿 q_o は、 $q_o = RH \cdot (3.74 + 2.64(T_o/10)^2) \times 10^{-3}$ と近似する。

式(2)~(5)を差分近似し、熱収支式(1)に代入することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} R_n(t) + \frac{\rho C_p \kappa^2 U_z}{\{\ln(Z_z/Z_o)\}z} \{T_a + \Gamma_a Z_z - T_o(t)\} \\ + \frac{\rho L \kappa^2 U_z}{\ln(Z_z/Z_o)} [q_a - RH\{3.74 + 0.0264 T_o^2(t)\} \cdot 10^{-3}] \\ + \frac{k_s}{d} \{T_s(t) - T_o(t)\} = 0 \end{aligned} \quad \dots(7)$$

熱伝導方程式(6)も次の差分で近似する。

$$T_m(t+1) = \frac{k_m}{\rho_m C_m d^2} \{T_b - 2T_m(t) + T_o(t)\} \cdot \Delta t + T_m(t) \quad \dots(8)$$

上式(7)、(8)の数値計算により地表面温度 T_o 、大気中の温度 T_a 、地中の温度 T_m が求められる。

2.2 一次元熱収支モデルの改善

実際の都市では地上構造物が熱容量を持つ。また、地表面からの放射は一定ではない。これらの点を考慮するためにモデルの改善を行う。

熱容量を考慮した場合の地表面における熱収支式は次式になる。

$$C_s \frac{dT_o}{dt} = R_n - H - LE - S \quad \dots(9)$$

また、地表面からの赤外線放射量は次の式で表される。(ボルツマンの放射法則)

$$IR_n(t) = \epsilon \sigma \{273 + T_o(t)\}^4 \quad \dots(10)$$

ここで σ はボルツマン定数、 ϵ は放射率である。これを地表面付近の熱収支式の正味の放射量の項の IR_n の代わりに用いる。キャノピー内の熱容量による慣性効果を考慮した結果、Myrupのモデルに比べ滑らかな変化曲線が得られる。

2.3 パラメータ依存性の検討(感度解析)

(1) Myrupモデル

粗度長 L 、相対湿度RH、アルビド α の値を以下の組合せで変化させ、感度解析を行った。

- ① パラメータを2つ固定した場合
- ② パラメータを1つ固定した場合

①の結果をFig. 2に、②の結果をFig. 3に示す。

(2) 改善モデル

Myrupのモデルとの相違は、地表面付近のキャノピーの熱容量と地面からの熱放射量の時間的変化とを考慮したことであり、これらと地表面温度との関係を調べる必要がある。

粗度長、相対湿度、アルビドの値を以下の組合せで変化させ、感度解析を行った。(1)と同様に、①の結果をFig. 2に、②の結果をFig. 3に示す。熱容量は $10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ で一定とした。

次に、熱容量が及ぼす影響を評価するため、キャノピー内の熱容量と地表面温度との関係を調べた。さらに熱容量と一日の最大温度・最小温度及びその差との関係を調べた。

- ① キャノピー内の熱容量と地表面温度との関係
- ② 熱容量と一日の最大温度・最小温度及びその差との関係

キャノピー内の熱容量と地表面温度の関係をFig. 4に示す。熱容量が増加するに従い、一日の最高温度は減少し、最低温度は増加している。

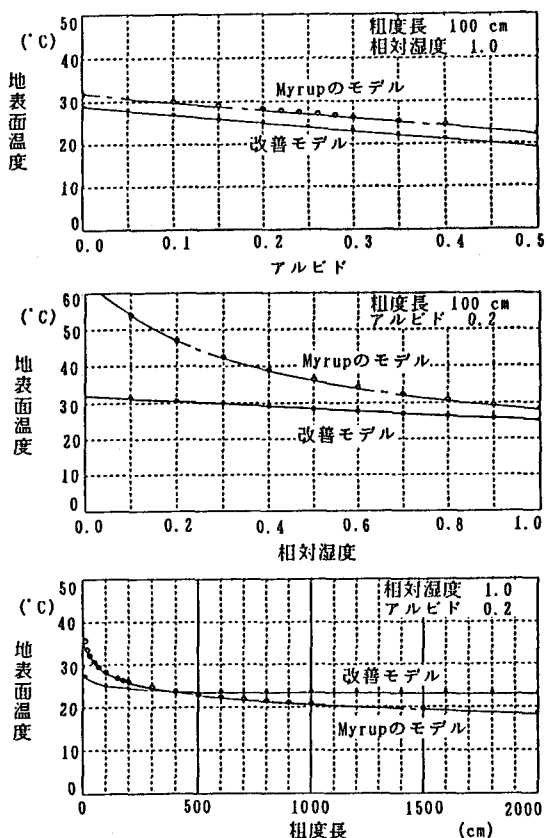


Fig. 2 パラメータを2つ固定した場合の地表面温度の変化

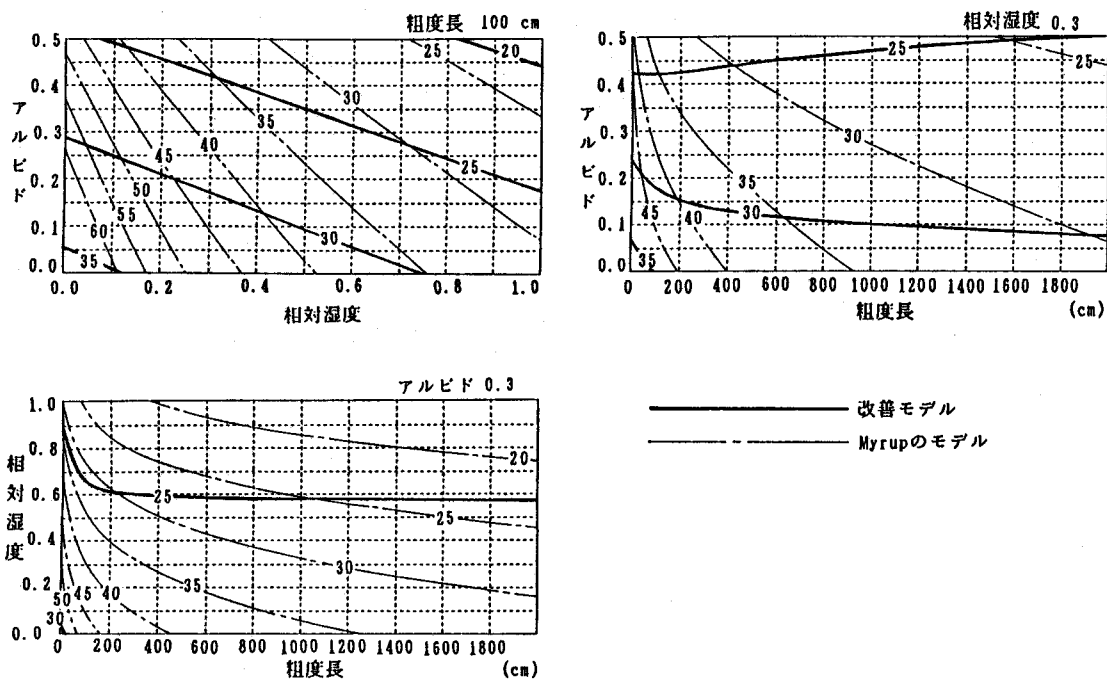


Fig. 3 パラメータを1つ固定した場合の地表面温度の等高線

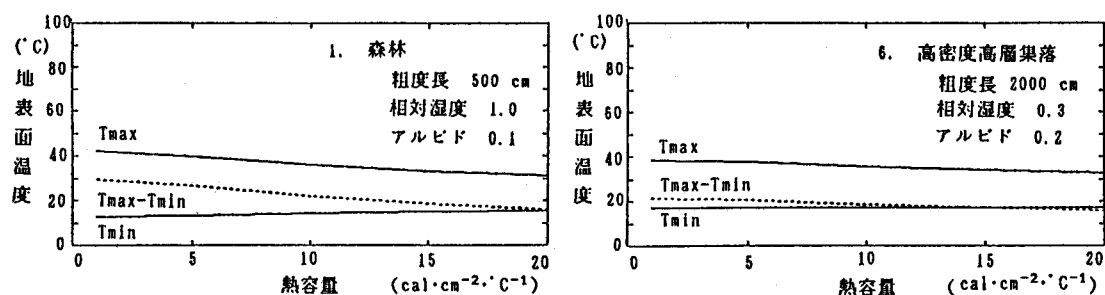


Fig. 4 熱容量と地表面温度の関係

3. リモセンデータによるモデルの検証（福岡市周辺）

3.1 土地被覆分類

福岡市周辺のリモセンデータを用いてモデルの検証を行ってみた。幾何補正したリモセン画像上で、視覚的に異なる領域を多数選出し、クラスタ分析により比較的分離度の高い55個の地域を残した。それらを7つのカテゴリーに分類し、土地被覆分類を得た。分類した7つのカテゴリーをTab. 1に示す。

3.2 カテゴリーの特性を表すパラメータの設定

土地被覆分類の7つのカテゴリーごとに、それぞれ3つのパラメータ（粗度長、相対湿度、アルビド）を設定した。その結果をTab. 1に示す。粗度長 z_0 、相対湿度RH、アルビド α 以外のパラメータ値は一定とした。気象データは、ランドサットの観測日の気象台の値とした。土の密度は、砂の密度 $\rho_s=1.4\sim1.7(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ を

用いた。地温は福岡市水道局の資料をもとに設定した。赤外線放射量は試算的に $0.1\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ とした。数値計算の際、2つの初期値 $T_0(0)$ 、 $T_m(0)$ は気象台のデータをもとに設定した。相対湿度は、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、本モデルでは、対象とする地域の全面積に対して蒸発散が自由に行われる面積の占める割合、つまり、コンクリート等で覆われていない地域の面積の割合とし、各カテゴリーの特性に基づいて値を設定した。従って、森林や裸地では $RH=1.0$ とし、高密度集落ではこれより小さい値としている。アルビドについては、地表面がコンクリートであると大きい値となるが、ビル街のキャニオン効果によってアルビドは小さくなると考えられるため、このような地域ではアルベド値は小さい値とした。

3.3 輝度温度分布図と地表面温度分布図との相関

(1) Myrupのモデル

LANDSAT TMのBAND6から輝度温度分布図を求めた。またBAND1～5、7より土地被覆分類図を得た。各カテゴリーごとにパラメータを決定し、モデルによって計算した値によって地表面温度分布図を作成した。輝度温度分布図とこの地表面温度分布図との一致について検証を行った。対象地域を東西に横断する線について、リモセンの輝度温度分布と計算による地表面温度分布の各断面図をFig. 5に示す。

断面は、A～Hを東西に横切る断面である。福岡市は、比較的高い建築物が集中しているF周辺、BやH等の緑地もあり、特性の異なる地域を含んでいる点で、モデルの検証に好都合である。

(2) 改善モデル

各カテゴリーの熱容量及び放射率の推定値とモデルによって計算した地表面温度の値をTab. 1に示す。Myrupのモデルの場合 24.2°C で最も低かった森林が、改善モデルでは 25.3°C となり、最も高かった高密度低層集落の 32.8°C が、 31.7°C になるというように温度差が縮まっている。改善モデルによる地表面温度分布の断面図をFig. 5に示す。

Tab. 1 入力パラメータと計算結果

No. カテゴリー	粗度長 (cm)	相対湿度	アルビド	Myrupのモデル			改善モデル		
				T_0	T_m	T_s	C_r	s	T_0
1. 森林	500	1.0	0.10	24.2	25.4	17.0	10	0.3	25.3
2. 水域	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3. 裸地	150	1.0	0.30	25.1	25.1	17.1	5	0.3	27.1
4. 低密度高層集落	800	0.5	0.25	27.3	30.2	18.9	15	0.3	28.2
5. 低密度低層集落	300	0.5	0.30	30.0	31.3	19.3	5	0.3	30.3
6. 高密度高層集落	2000	0.3	0.20	28.7	35.3	20.0	20	0.3	28.5
7. 高密度低層集落	500	0.3	0.30	32.8	36.0	20.6	5	0.3	31.7

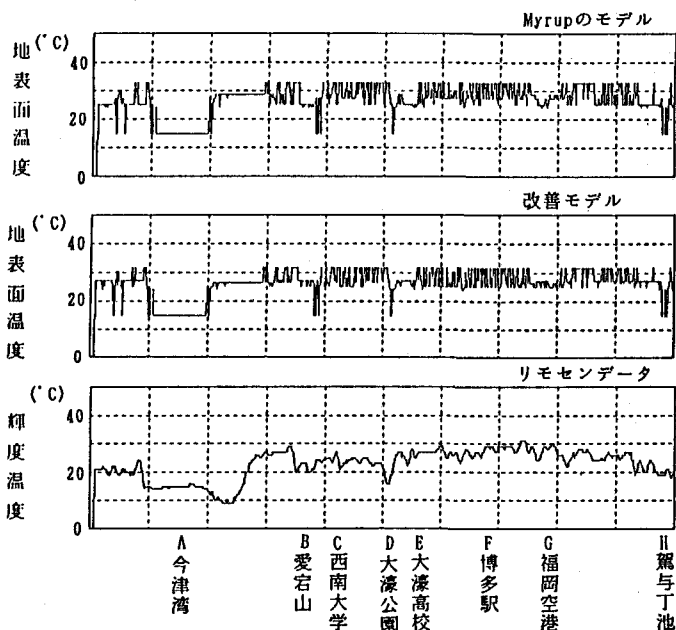


Fig. 5 地表面温度の断面図

(3) 数値的検証

リモセンデータを用いて、比較的小さな領域を選択し、各カテゴリーごとに輝度温度の頻度分布図を作成し、モデルによる計算結果の数値的検証を行った。

海沿いの、公園の緑地を含む市街地の領域について、各カテゴリーごとの頻度分布をFig. 6に示す。横軸はリモセンの輝度温度、縦軸は各カテゴリーごとに正規化した頻度である。緑地は、 22°C 付近にピークがある。低密度高層集落は 27°C 付近、低密度低層集落は 25°C 付近、高密度高層集落は 28°C 付近と 20°C 付近、高密度低層集落は、 21°C 付近にピークがある。市街地の4つのカテゴリーのピークは、モデルの計算結果と相対的に一致していない。これは、リモセンデータの被覆分類が、モデルと正確に対応していないためと考えられる。

郊外の森林中央部の領域については、 17°C 付近にピークがあり、市街地の領域の緑地に比較して 5°C 程度低い。モデルを用いて、広範囲の地域について説明する場合、地温の違い等を考慮する必要がある。

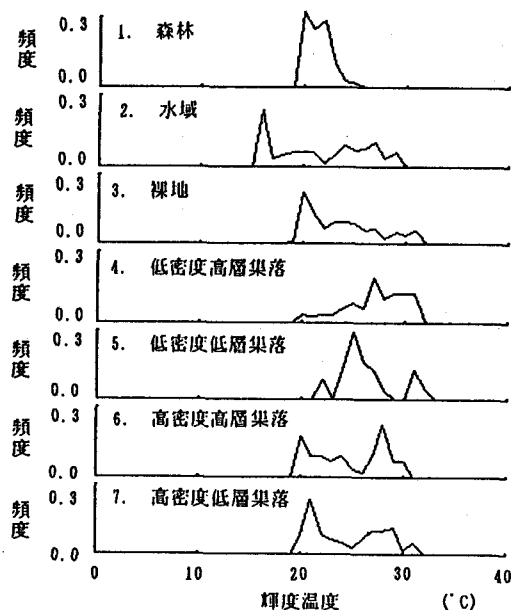


Fig. 6 リモセンデータの輝度温度の頻度分布

4. おわりに

リモセンの土地被覆分類に応じてモデルのパラメータを決定して計算した温度分布とリモセンによる輝度温度分布の関係を分析した。また、大気モデルの感度解析の結果、粗度長、相対湿度、アルビド及び熱容量が都市の熱環境に及ぼす効果を明らかにした。以下のような現象が一般に言われているが、Fig. 2~4はこれらを定量的に説明するものである。

- ①緑地率の増大とともに地表面温度は一般に低くなる。
- ②土地被覆状態のコンクリート化は、一般にアルビドを増大させ、地表面温度を低くする。
- ③粗度長が大きくなる場合（高い建物がある場合）、一般に熱容量も大きくなるので、一日の最高気温と最低気温の差が小さくなる。

感度解析によって、緑地率の増大は一日中における最大温度・最小温度をともに低下させるが、アルビドの増大は主に最大温度の低下に寄与する。また、粗度長の増大は最大温度と最小温度の差を小さくし、熱環境的な変動を小さくする役割を果している。改善モデルでは、熱容量の増大が一日の最大温度と最小温度の差を小さくするように作用している。今後、都市内の建築物による粗度長の変化、透水性舗装の導入等による相対湿度の変化などが都市の熱環境構造に及ぼす効果について、定量的な分析を進める必要がある。また、本モデルでは鉛直方向の熱輸送しか考えていないが、より現実的なモデルとするためには、水平方向の大気の動きを考慮したモデルを考える必要がある。さらに、高層建築物に囲まれた地域では、キャニオン効果についても検討する必要がある。

《参考文献》

- 1) L. O. Myrup: J. Appl. Meteor. vol. 8, pp. 908-918 (1969)
- 2) 河村 武: 「大気環境の科学3」(都市の大気環境 第3巻 東京大学出版会), pp. 139-157(1979)
- 3) 星 仰: 「リモートセンシング工学の基礎」(森北出版株式会社), pp. 43-52(1984)