

(13) 都市の熱環境制御手法に関する研究 (第2報)

STUDY ON THE CONTROL OF THERMAL ENVIRONMENT IN CITIES (2)

瓜生良知* 上野賢仁* 井村秀文*
Nagachika URYU*, Takahito UENO*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Urbanization induces the increase of energy consumption in cities. It also alters the land use and cover in urban areas. Combination of these changes results in the temperature increase in cities, and thereby cause the increasing demand of energy required for air conditioning especially in summer. Thus, it is imperative to reexamine the physical structure of the cities with a view to alleviating the heat-island phenomena caused by urbanization. For this purpose, this study aims to establish the relationship between the urban thermal structure and the parameters specifying the land use pattern of the area under consideration (albedo, roughness length, relative humidity, and heat capacity). The analysis is based on an energy budget model. For Fukuoka City area, surface temperature estimated by the model is compared with the infrared surface temperatures data obtained from satellites (NOAA). A relatively good correlation was found between them, but further analysis must be made to achieve a better agreement.

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

1. はじめに

都市の気温がその周辺地域より高いというヒートアイランド現象は古くから知られている。ヒートアイランドは、夏季の冷房需要を拡大する等、都市におけるエネルギー消費増大の一因となっている。このため、1990年10月に決定された政府の「地球温暖化防止行動計画」^[1]においても、その第一番目の施策として、都市緑化を推進し、植物のもつ気温緩和効果によってヒートアイランド現象をやわらげ、冷房に要するエネルギー需要を低減することが挙げられている。

都市の熱環境は、その都市の地理的特性(気象特性)とエネルギー消費構造(人工排熱)および物理的構造(地表面状態)によって決定される。熱環境については、目的に応じて異なった視点から研究がなされている。地理的特性と熱環境の関係について、海陸風の効果を取り上げ、都市が本来持つ気象緩和効果を評価しようとする試みがある。また、気象モデルによって、ヒートアイランドが都市気象に与える影響を検討し、その現象とメカニズムを分析しようとする研究も多く行なわれている。都市のエネルギー消費構造が熱環境へ与える影響についても、人工排熱の量と効果について検討されている。物理的構造については、リモセンデータを用いて緑地の比率と都市温度の関係が研究されている。

*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.

筆者らは、前報告^[2]で、リモセンデータと熱収支モデルを組み合わせることにより、都市の物理的構造と熱環境との関連づけを試みた。本報告では、都市気象緩和のための工学的制御手法の確立を目指す観点から、都市の物理的構造と熱環境の関係を分析するとともに、都市熱環境を評価するための指標について考察する。この目的のために地表面状態から物理特性を表すパラメータ（以下、地表面パラメータ）を求め、熱収支モデルに基づいて地表面温度（計算温度）を算定する。次に、この値とリモセンデータとの比較を行うことにより、計算温度を熱環境指標として用いることの意味、可能性を考察・検討する。

都市の被覆状態を把握するために、LANDSAT TM のデータを利用する。地表面温度（輝度温度）としては、NOAAデータを用いる。都市の地表面状態とヒートアイランド現象の関係を説明するために熱収支モデルを用いる。前報告では、LANDSAT TMのデータを用いて、都市の被覆状態と輝度温度を求め、比較を行った。しかし、LANDSAT TMのデータは被覆分類についてはかなりの精度が得られるが、得られるデータの時間帯に制約があり、都市の温度構造を分析する上では必ずしも適していない。このため、本研究では、輝度温度として、利用可能データの時間的制約が少なく、広範囲のデータが得られ、かつ入手の容易なNOAAデータを用いることとした。被覆分類には、LANDSAT TMのデータを用い、熱収支モデルによって求めた地表面温度を面積平均し、NOAAデータと比較した。

2. 解析手順

都市熱環境の支配因子（物理的構造、気象特性、エネルギー消費構造）のうち、物理的構造が熱環境に及ぼす影響を定量的に評価するため、以下に示す手順で解析を行った（図1参照）。

2.1 熱収支モデル

(A) 典型的な建物構造、植栽などによって都市の被覆分類をパターン分類する（ここでは、7 カテゴリーに分類）。

(B) (A)で分類した土地被覆パターンに対応する地表面パラメータ（アルベド、相対湿度、粗度長、熱容量）を算定する。

(C) 熱収支モデルを用いて、土地被覆パターンごとの地表面温度を計算する。

2.2 リモセンデータ (LANDSAT TM)

(A) 福岡市について土地被覆をLANDSAT TM のデータ（1984年5月22日、BAND1~5,7）により分類する（ここでは、7 カテゴリー、1 メッシュ30m×30mに分類）。

(B) 2.1 (C)で求めた地表面温度を、(A)で求めた被覆分類図に対応させる。

(C) (B)で得た地表面温度を面積平均（1 メッシュ約1km×1km）する。

2.3 リモセンデータ (NOAA)

気象衛星NOAAのデータ（1990年2月20日14時、1990年8月14日14時、BAND4）より輝度温度分布図（1 メッシュ約1km×1km）を得る。

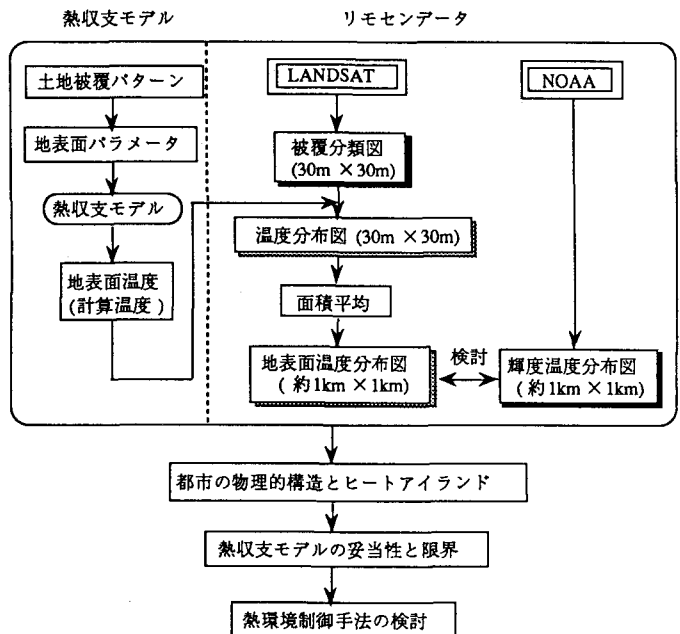


図1 解析手順

2.4 熱収支モデルとリモセンデータ

2.2 (C)で得た地表面温度分布図(1メッシュ約1km×1km)と、2-3の輝度温度分布図(1メッシュ約1km×1km)を比較・検討する。

3. 地表面温度の計算

3.1 都市構造のモデル化

地表面温度、大気温度及び地中温度は、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

[3]。熱環境を支配する都市構造の特性は、対象地域のアルベド(土地の被覆状態の関数)、相対湿度RH(水の蒸発散が自由に行える面の割合)、粗度長(建物の高さの関数)及び熱容量(土地の被覆状態の関数)の4つのパラメータで

表される[2]。本研究では、7つの典型的な都市の地表面状態を考え(図2参照)、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。都市の地表面を構成する要素としては、コンクリート、アスファルト、土壌、木、草地を仮定した。

3.2 地表面パラメータの決定

以下、4つのパラメータの決定方法を示す。

(A) アルベド

都市のアルベドは、文献から得た地表面構成物の個々のアルベド値を、対象地域について面積平均することにより求める(式(1))。建築物、道路、土壌、木、草地のアルベドは、それぞれ0.40、0.12、0.33、0.18、0.21とする。

$$\text{アルベド} = \frac{\sum (\text{各地表面のアルベド} \times \text{各地表面積})}{\text{総面積}} \quad (1)$$

(B) 相対湿度

都市の相対湿度は、地表面構成物の個々の相対湿度を仮定し、対象地域について面積平均することにより求める(式(2))。相対湿度は、水の蒸発散が自由に行える面の割合としているから、建築物、道路を0、土壌、木、草地を1とする。

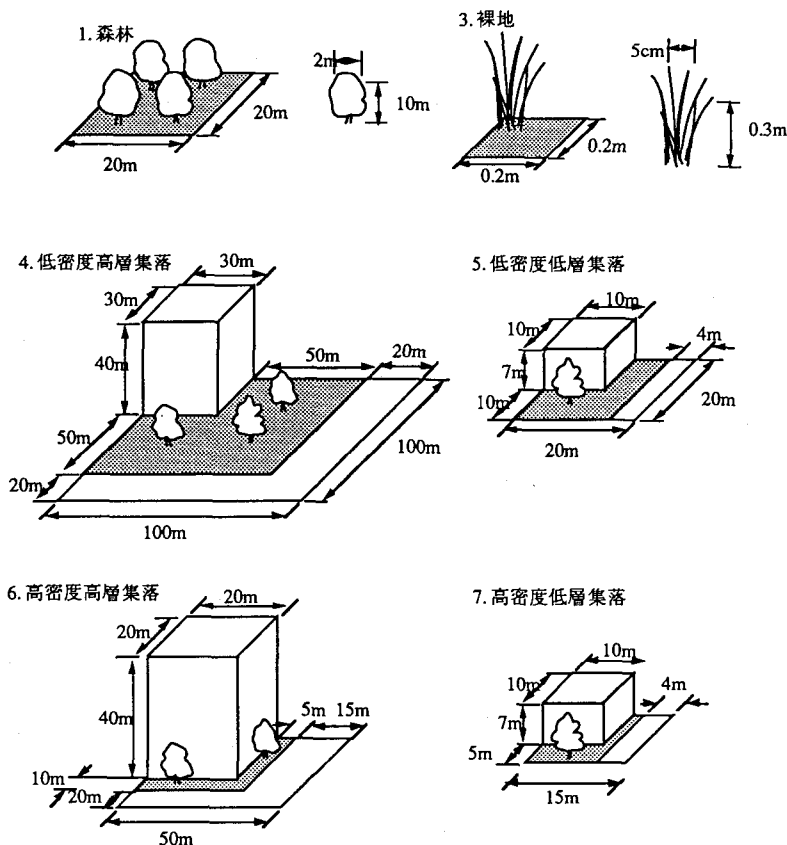


図2 典型的な都市の地表面状態

$$\text{相対湿度} = \frac{\Sigma(\text{各地表面の相対湿度} \times \text{各地表面積})}{\text{総面積}} \quad (2)$$

(C) 粗度長

粗度長とは、建物、木、草等により地表面に吹く風が遮られるときの地表面の粗さを表すものである。ここでは次式^[4]を用いて近似する（式(3)）。

$$\text{粗度長} = 0.5 \cdot h \cdot s / (A/n) \text{ (cm)} \quad (3)$$

但し、h：平均垂直高さ(cm)

s：平均障害物の影像面積＝建物の幅(cm)×h(cm)

A：対象とする面積(cm²)

n：A内における障害物の個数

(D) 熱容量

都市の熱容量は、地表面構成物の個々の熱容量値をもとに、対象地域について面積平均することにより求める（式(4)）。建築物の正味の体積は、建物表面積×30(cm)と仮定する。また、それ以外の地表面構成物の体積は表面積×10(cm)と仮定する。建築物、道路、土壌の熱容量は、文献値をもとにそれぞれ 0.48、0.45、0.51とした。木、草地については、0.46と仮定する。

$$\text{熱容量} = \frac{\Sigma(\text{各地表面の熱容量} \times \text{各地表面体積})}{\text{総面積}} \quad (4)$$

3.3 熱収支モデルによる計算

3.2で求めた地表面のパラメータを用い、熱収支モデルによって、地表面温度を求める。境界条件は、気象台の観測値をもとに決定した。土地被覆カテゴリごとの地表面パラメータ及び地表面温度を表1に示す。計算に用いた境界条件を表2に示す。

4. リモセンデータによる地表面温度計算値の評価（福岡市）

熱収支モデルを用いて求めた地表面温度が、実際にどのような意味を持つのかを検討する必要がある。3.3で得た地表面温度をリモセンデータと比較することによりこれを検討する。

都市の熱環境を代表する温度としては、気温、地温、リモセンによる輝度温度等が挙げられる。この内、リモセンによる輝度温度は、広域にわ

表1 地表面パラメータ及び地表面温度

NO.カテゴリ	アルベド	粗度長 cm	相対湿度	熱容量 calcm ⁻² k ⁻¹	TA ℃	TB ℃
1.森林	0.317	150	1.0	22.32	6.92	25.1
2.水域	—	—	—	—	—	—
3.裸地	0.323	5.63	1.0	5.948	8.79	27.9
4.低密度高層集落	0.195	240	0.55	12.24	11.2	33.0
5.低密度低層集落	0.240	61.3	0.55	16.52	10.8	32.6
6.高密度高層集落	0.239	960	0.20	35.30	13.2	41.4
7.高密度低層集落	0.270	109	0.29	25.80	12.0	37.2

TA:地表面温度（1990年2月20日14時5分）

TB:地表面温度(1990年8月14日14時15分)

たって体系的にデータが得られるという利点がある。本報では、比較的高分解能のLANDSAT TMのデータを土地被覆分類に用い、輝度温度についてはNOAAデータを用いた。

4.1 LANDSAT データからのアプローチ

(A) LANDSAT TM のデータ
(1984年5月22日,BAND1～5,7)を幾何補正し、7つのカテゴリーに分類する。

(B) 3.3より求めた各カテゴリーの地表面温度を、(A)で分類したカテゴリーに対応させ、地表面温度分布図（1メッシュ30m×30m）を作成する。

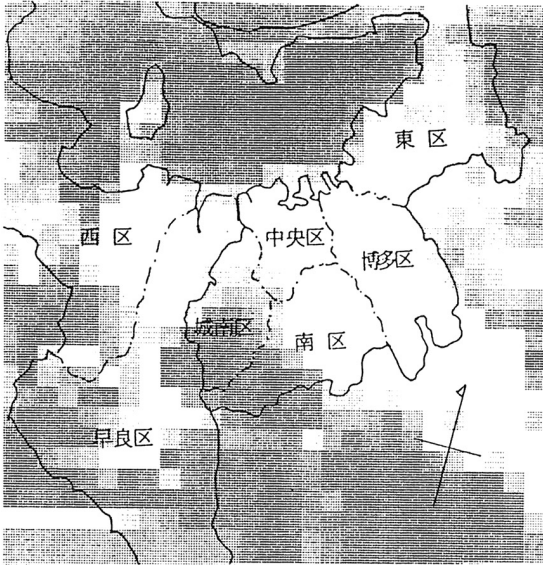
(C) (B)で得た地表面温度分布図から、面積平均により1メッシュ約1km×1kmの地表面温度分布図を得る(図3-A参照)。

4.2 NOAA データからのアプローチ

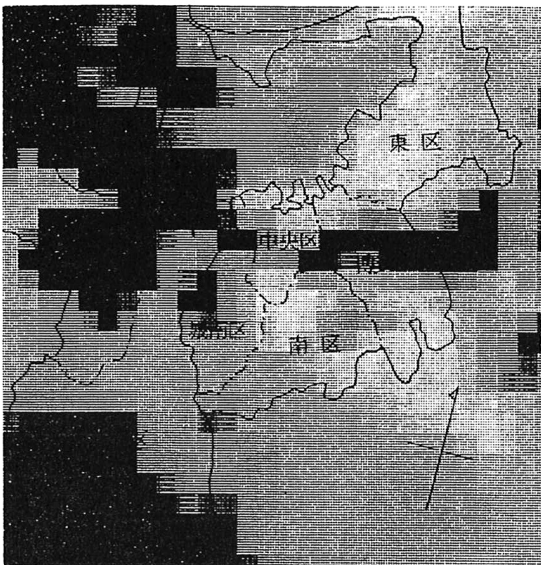
気象衛星NOAAのデータ（1990年2月20日14時、1990年8月14日14時）を幾何補正し、輝度温度分布図（1メッシュ約1km×1km）を得る(図3-B参照)。

表2 境界条件

境界条件	1990年2月20日	1990年8月14日
気象条件を一定と考える高さ Z2 (cm)	100000	100000
Z2 における風速 (cm/min)	48705	23887
Z2 における気温 (℃)	3.138	23.24
Z2 における比湿	0.00295	0.0145
地中温度を一定と考える深さ Zb (cm)	100	100
Zb における温度 (℃)	12.5	23.0



A：地表面温度分布図（計算温度）



B：NOAA 輝度温度分布図

■ 20℃以下（雲） ▨ 25℃ ▩ 30℃ □ 35℃ □ 40℃以上

図3 1990年8月14日14時の地表面温度分布図（計算温度）と NOAA 輝度温度分布図
（1メッシュ約1km×1km）

4.3 地表面温度計算値と輝度温度分布図の比較

4.1 (C)から得られる地表面温度分布図と4.2から得られる輝度温度分布図を重ね合わせて、雲の影響のない領域について比較をおこなった。夏(1990年8月14日14時)のデータについては、市街地と郊外の緑地を適度に含んだ領域(福岡市東部、約10km×10km、データ数100個)を選んだ。冬(1990年2月20日14時)については、海岸沿いの領域(福岡市中央部、約5km×20km、データ数100個)を含めて比較を行った。このようにして求めた地表面温度と輝度温度の関係を図4に示す。

図4より比較的良好な相関を見ることがができる。

4.4 考察

1990年2月20日14時の地表面温度の計算値は、NOAAデータより得られる輝度温度よりも概して低い値を示した。しかし、1990年8月14日14時の地表面温度の計算値は、NOAAデータより得られる輝度温度よりも高い値を示した。この理由としては、本報で用いた熱収支モデル式では、気象特性、例えば、海陸風の効果などを考慮していないこと、都市自身のエネルギー消費に伴う排熱の影響を考慮していないことがあげられる。

5. おわりに

都市の地表面状態から熱収支モデルを用いて求めた地表面温度(計算温度)は、都市固有の物理的特性と熱環境を評価する1つの指標となり得る。本研究では、計算温度とLANDSAT TM及びNOAAから得られる諸情報を組み合わせることにより、地表面状態とヒートアイランドの地域的分布について考察した。

今後の課題としては、物理的構造と熱環境の関係をより明確にすることによって、計算温度を都市の熱環境指標として利用していく上での精度向上が挙げられる。この点について、今回用いたような気象条件を考慮しない熱収支モデルには一定の限界がある。ヒートアイランド現象を総合的視野でとらえるためには、本研究では正面から取り上げなかった他の2つの因子(気象特性とエネルギー消費構造)についての検討が必要となる。

《参考文献》

- [1] 環境白書平成3年度版
- [2] 上野賢仁,永嶋聡志,井村秀文,楠田哲也:環境システム研究,vol.18,pp.101-106 (1990)
- [3] L.O.Myrup:J.Appl.Meteor.,vol.8,pp.908-918 (1969)
- [4] H.Lettau:J.Appl.Meteor.,vol.8,pp.828-832(1969)

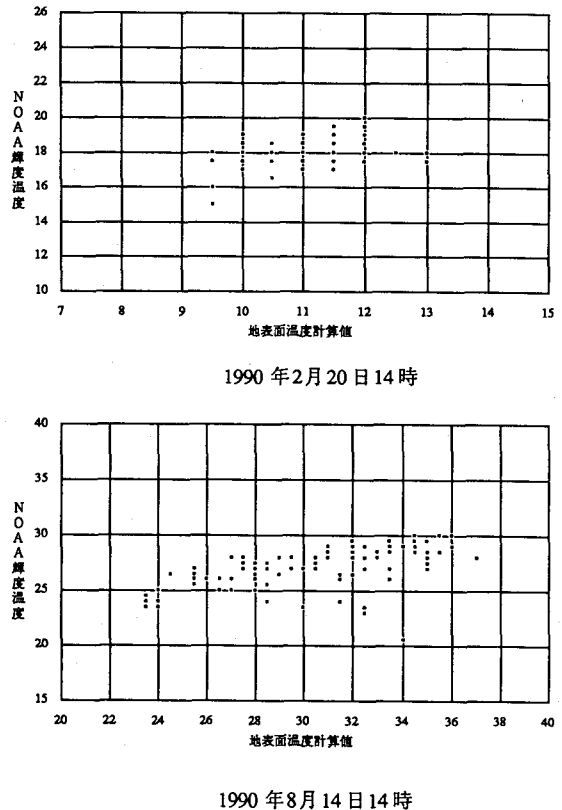


図4 地表面温度計算値と輝度温度分布図