

(37) 都市の熱環境制御に関する研究

—次元熱収支モデルによる地表面温度とリモセン輝度温度との比較—

STUDY ON THE CONTROL OF THERMAL ENVIRONMENT IN URBAN AREAS

上野賢仁*

森圭太郎*

前田利家*

瓜生良知*

井村秀文*

Takahito UENO*, Keitaro MORI*, Toshiie MAEDA*, Nagachika URYU*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Energy consumption in urban areas is increasing with expanding population and human activities. With this, physical structure of urban land surface is subject to rapid changes due to construction of higher buildings, increasing concrete covers, decreasing wooded areas, etc. This causes climatic changes in urban areas, such as the rise in average temperature, formation of heat islands and dry weather. The objective of this study is to analyze the relationship between the physical structure of cities and their thermal characteristics, and thereby to obtain practical information for controlling the thermal environment in cities. The one-dimensional energy budget model developed by Atwater was applied to calculate interface temperature in Fukuoka City area. The computation was performed by changing parameter values of albedo, roughness height and moisture availability, and the effect of these parameters and boundary conditions was examined. Surface temperature computed by the model was compared with the brightness temperature obtained by remote sensing data (LANDSAT TM and NOAA).

KEYWORDS; heat island, remote sensing, urban climate, thermal structure of cities, thermal environmental control

1. はじめに

都市への人口・経済活動の集中とともに、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（物理的特性の変化）が進んでいる。このために、湿度低下・乾燥化、夜間放熱の増大などの変化が生じ、ヒートアイランド現象と呼ばれる都市気候の変化が起きている。また、都市が巨大化するにつれて、冷暖房や自動車交通のための都市内エネルギー消費が増大し、ヒートアイランド現象は助長される。環境的に住みやすい都市をつくるためには、このような状況を改善していく手法の確立が求められる。

都市の熱環境は地表面の被覆状態及び人工排熱、気象特性によって決定される。したがって、熱環境の制御手法としては、地表面の改変、人工排熱の低減、水面や風の効果を積極的に取り入れること等が考えられる。筆者らは、特に地表面の被覆状態に着目し、次元熱収支モデルによって都市の物理的構造と地表面温度との定量的関係を分析し、また、モデルとリモセンデータとを組み合わせることにより、計算地表面温度とリモセン輝度温度とを比較・検討してきた^{[1][2]}。本研究では、以下の点についてこれまでの研究内容の改善を図った。(1)熱収支モデルとしてこれまで用いたMyrupのモデルの代わりにAtwater^[3]のモデルを用いることによって、温度、比湿及び風速については鉛直方向の変化のみを考慮した。(2)被覆分類を細かくし、16カテゴリーにまで増やした。(3)リモセンデータに雲の影響のほとんどない日時のデータを用いた。

* 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

2. 解析手順

解析は、(1) 一次元熱収支モデルによる解析（モデルによって地表面温度を計算する。ここで、土地被覆パラメータはLANDSAT TMから得る）、(2) LANDSAT TM及びNOAAのデータによる地表面輝度温度の解析、(3) (1)及び(2)の比較・検討、の3部分で構成される（図1）。

(1) 熱収支モデルによる計算地表面温度

Atwaterの熱収支モデルを用いて、地表面の物理的特性を表すパラメータ（アルベド、粗度長、蒸発能について）、人工排熱、上空境界における風速、水平方向の移流を変化させた時の地表面温度及び高度6mの気温の変化について感度解析を行った。

福岡市及びその周辺について、LANDSAT TM BAND 1～5, 7 により被覆分類図を求めた。LANDSAT TMによる被覆分類の各カテゴリーに対し典型的な建物構造・植栽等をそれぞれ仮定し、地表面パラメータを算定した^[2]。これらを用い、気象台の観測データから求めた境界条件のもとに、地表面及び上空、地中の温度を求めた。LANDSAT TMの被覆分類図に計算地表面温度を対応させ、面積平均によって1メッシュ990m×990mの計算地表面温度を得た。

(2) LANDSAT TM及びNOAAによる輝度温度

LANDSAT TM BAND 6から輝度温度分布図を求めた後、面積平均により1メッシュ990m×990mの輝度温度分布図を得た。また比較対照のためNOAA BAND 4から輝度温度分布図（分解能約1km）を求めた。

(3) 計算地表面温度とリモセン輝度温度との比較・検討

(1)及び(2) から求めた地表面温度を比較・検討した。

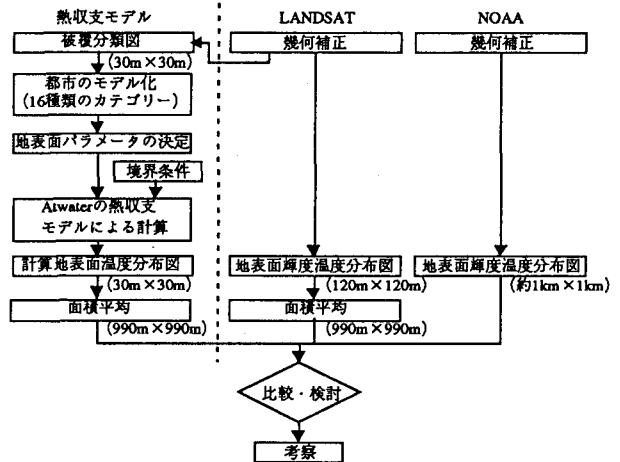


図1 解析手順の図

3. 熱収支モデルによる地表面温度の計算

本研究ではAtwaterのモデルを用いた。ここでは、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）と蒸発能（水の蒸発が自由に行なえる面積の割合）、粗度長（建物の高さの関数）、熱容量及び熱拡散係数（土地の被覆状態の関数）で表される。

3.1 Atwaterの熱収支モデル

モデルの基礎式を以下に示す。まず、大気中の風速、比湿、気温の関係は、次の保存式で与えられる。

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} + V \cdot \nabla X_i = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_i (R_i, z) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + A_i \quad \dots (1)$$

地中の熱伝導は、次の熱拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \dots (2)$$

Xi: 変数（風速、温度、比湿）、
V: 風速ベクトル、Ki: 拡散係数、
t: 時間、z: 高度または深度、
Ri: リチャードソン数、
T: 地温または地表面温度、
Ai: 発生項、Ks: 土の熱拡散係数、
Rn: 正味の放射フラックス、
LE: 潜熱フラックス、
A: 顕熱フラックス、
S: 地中への顕熱フラックス、
Rm: 人工排熱、
a: アルベド、Tr: 大気の透過係数、
Ro: 太陽定数、ε: 放射率、
σ: ステファンボルツマン定数、
L: 水の潜熱、ρ: 空気密度、
Kc: 渦拡散係数、cp: 空気の比熱、
φ: 緯度、δ: 赤緯、γ: 時角、
q: 比湿、Γ: 乾燥断熱減率、
C: 土の熱容量、
qo: 地表面の比湿、M: 蒸発能、
qs: 地表面の飽和比湿、
qa: 大気最下層の比湿、
κ: フォンカルマン定数、
zoo: 上空境界の高度、zo: 粗度長、
U∞: 上空境界の風速

図2 変数の説明

地表面温度は、次の熱収支式によって求める。

$$0 = R_n - LE - A - S + R_m \quad \dots (3)$$

ここで、正味の放射フラックス R_n 、潜熱フラックス LE 、顕熱フラックス A 、地中への顕熱フラックス S は、以下の各式で与えられる：

$$R_n = (1 - a) T_r R_o \left| \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\gamma \right| - \epsilon \sigma T^4 \quad \dots (4)$$

$$LE = -L \rho K_e \frac{\partial q}{\partial z} \quad \dots (5)$$

$$A = -\rho c_p K_e \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \quad \dots (6)$$

$$S = -C K_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad \dots (7)$$

地表面の比湿 q_0 は次式で与えられる：

$$q_0 = M q_s + (1 - M) q_a \quad \dots (8)$$

また式(5)、(6)中の渦拡散係数 K_e は、大気の状態を中立と仮定し、次式で与えられる：

$$K_e = \frac{\kappa^2 z}{\log(z_\infty/z_0)} U_\infty \quad \dots (9)$$

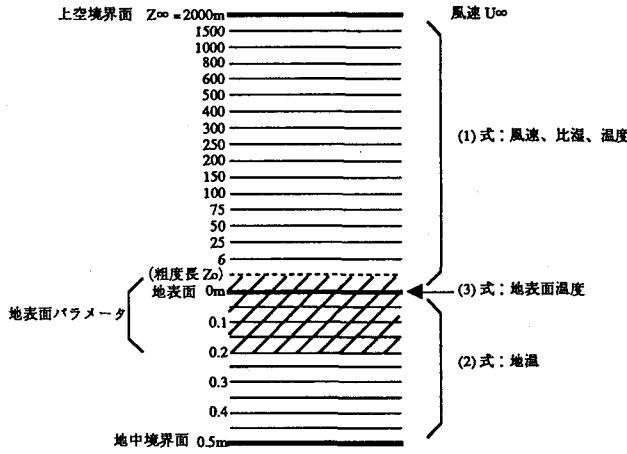


図3 モデルの概念図

以上の式に基づいて、数値計算を行った。ここで、大気、地表面、地中は図3のような層に分割した。計算上の仮定を以下にまとめる。

- (1) 全ての気象条件と地中パラメータは水平方向に均一とする。
- (2) 大気は中立状態であるとする。
- (3) 雲や大気中の汚染物質の影響は考慮しない。
- (4) 移流項を無視する。

3.2 感度解析

地表面パラメータ（アルベド、粗度長、蒸発能）及び人工排熱、上空境界における風速、移流を変化させた時の地表面温度の変化について計算を行った（図4）。境界条件はリモセンデータの観測日の気象台のデータより求めた値を用いた（表1）。地表面パラメータは住宅地の値を基本とした（表2）。

(1) アルベド

アルベド値は0～0.3の範囲で変化させた。アルベド値が増大すると正味の放射フラックスが減少する。アルベドの増大に比例して最大温度は低下する（図4(a)）。

(2) 粗度長

粗度長を0.01～300cmの範囲で変化させた。粗度長が増大すると大気の渦拡散係数の値が大きくなり、潜熱フラックス又は顕熱フラックスが増大する。粗度長が増大すると最高温度は低くなり、最低温度は高くなる。粗度長が増大すると最高温度と最低温度の差が低くなる。また、粗度長が10cm付近以上で地表面の最高

表1 境界条件（1988年4月15日）

上空 (2000m)	東向きの風速 (m sec ⁻¹)	0.0
	北向きの風速 (m sec ⁻¹)	14.35
	比湿	8.37×10^{-4}
	温度 (℃)	0.5
地中 (20cm)	地温 (℃)	15.4

表2 感度解析に用いた地表面パラメータ（住宅地）

アルベド	粗度長 cm	熱容量 cal K ⁻¹ cm ⁻³	蒸発能	熱拡散係数 cm ² min ⁻¹
0.25	100.0	0.48	0.1	0.19

温度よりも高度6mの最高温度の方が高くなる（図4(b)）。

(3) 蒸発能

蒸発能を0~1の範囲で変化させた。コンクリートのように蒸発能が0になると温度はかなり高くなり、森林のように蒸発能が1に近い値となるとかなり低い温度となった。この様に、蒸発能の違いによって、地表温度は10℃以上の差が生じる。ただし、蒸発可能な水分が十分に存在しなければならないので、実際にはこれ程の変化は生じない可能性がある。また蒸発能が0.08付近以上で地表面の最高温度よりも高度6mの最高温度の方が高くなる（図4(c)）。

(4) 人工排熱

人工排熱は一日を通して一定（ $0 \sim 0.20 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ）と仮定して計算した。Oke (1977) ^[4]によると、東京23区の人為的発熱の大きさは $0.100 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ である。この場合、計算結果によると最高温度と最低温度ともに約1℃高くなる（図4(d)）。一般に、人工排熱の影響は最高温度よりも最低温度に影響する。ここで示した図では、それほど大きな違いが示されていないが、これは、移流項を無視して計算したためではないかと思われる。

(5) 風速

上空境界2000mの風速を変化させた時の地表面温度の変化を調べた。0~5 m sec^{-1} の範囲では風速の変化に対して温度の変化が大きい。リモセン観測日の計算では上空境界の平均風速は14.35 m sec^{-1} であったが、この値付近では風速が多少変化しても地表面温度の計算結果にそれほど顕著には影響しない。また風速が10 m sec^{-1} 付近以上で地表面の最高温度よりも高度6mの最高温度の方が高くなる（図4(e)）。

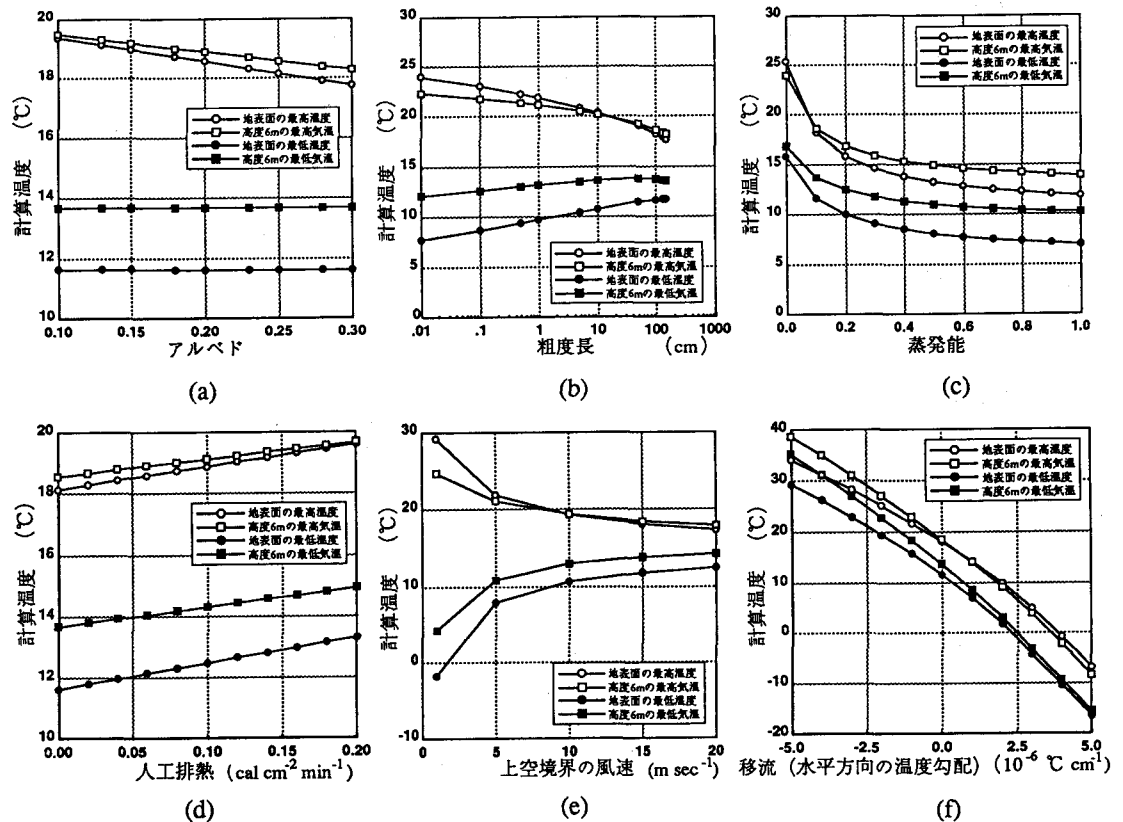


図4 地表面パラメータ及び風速、移流を変化させた時の計算温度の変化（感度解析）

表3 16種類の各カテゴリーの地表面パラメータと計算温度

カテゴリー	地表面パラメータ					1988年4月15日の計算温度 (単位:℃)							
	アルベド	粗度長 cm	熱容量 cal K ⁻¹ cm ⁻³	蒸発能 —	熱伝導係数 cm min ⁻¹	最高温度		最低温度		午前8時		午前10時	
						地表面	高度6m	地表面	高度6m	地表面	高度6m	地表面	高度6m
1. 水域	0.10	0.01	1.00	1.0	0.10	17.1	17.9	4.1	9.7	10.9	13.4	15.0	16.1
2. 裸地	0.20	0.1	0.30	0.3	0.10	19.7	19.6	6.2	10.9	13.4	15.1	17.8	18.0
3. 森林1	0.15	100.0	0.36	0.7	0.14	13.1	14.8	7.5	10.6	10.4	12.6	12.3	14.1
4. 森林2	0.10	10.0	0.38	0.3	0.13	17.8	18.4	8.3	11.8	13.2	15.0	16.4	17.2
5. 砂浜	0.25	0.03	0.51	0.3	0.30	18.8	19.0	6.5	11.2	12.5	14.6	16.6	17.2
6. 芝生	0.20	0.5	0.50	0.5	0.25	16.6	17.6	6.3	10.9	11.5	13.9	14.9	16.2
7. 競技場	0.20	5.0	0.38	0.4	0.16	16.3	17.4	7.4	11.4	12.0	14.2	15.0	16.3
8. ゴルフ場	0.20	5.0	0.49	0.4	0.26	16.1	17.3	7.6	11.5	11.9	14.1	14.8	16.1
9. 水田	0.15	1.0	0.74	0.8	0.31	15.2	16.7	6.1	10.7	10.5	13.3	13.6	15.4
10. 団地	0.20	150.0	0.55	0.2	0.28	15.6	16.6	10.1	12.4	12.8	14.3	14.7	15.8
11. 住宅地	0.25	100.0	0.48	0.1	0.19	18.1	18.6	11.6	13.7	14.9	16.0	17.2	17.7
12. ビル	0.30	300.0	0.67	0.0	0.58	23.0	22.4	16.7	17.3	19.5	19.4	21.7	21.3
13. 金属構造物	0.20	100.0	0.69	0.0	0.82	24.3	23.1	16.0	16.9	19.4	19.4	22.4	21.6
14. コンクリート構造物	0.30	0.3	0.67	0.0	0.58	25.2	23.2	12.6	15.1	17.7	18.0	22.1	20.9
15. アスファルト構造物	0.20	0.3	0.52	0.0	0.05	31.9	27.7	11.4	14.3	21.2	19.9	28.3	24.7
16. 線路	0.10	1.0	0.56	0.0	0.42	30.1	26.5	13.0	15.3	20.2	19.6	26.2	23.5

(6) 移流

以下の5.における解析では移流項を無視するが、このような取り扱いによって計算温度にどの程度の変化が生じるかを検討した。水平方向の温度勾配を一定と仮定し、その値を変化させた時の地表面温度の変化を調べた。温度勾配は $-5.0 \sim 5.0 \times 10^{-6} \text{℃cm}^{-1}$ の範囲で変化させた(図4(f))。

3.3 熱収支モデルによる計算

リモセン観測日時(1988年4月15日午前10時及び午前8時)について、LANDSAT TMによる被覆分類(以下の4.における解析)の各カテゴリーに対応した被覆状態を仮定して地表面パラメータを算定した。境界条件は気象台の観測値から求めた(表1)。地表面パラメータと計算結果を表3にまとめる。カテゴリー1~11については、地表面の最高温度よりも高度6mの最高気温の方が高い値となっている。これは、気象台の観測データから求めた境界条件の風速、粗度長及び蒸発能の値が原因と考えられる。代表的な6つのカテゴリーについて、地表面温度、高度6mの温度及び各フラックスの一日の変化を図5に示す。LANDSAT TMの被覆分類図と計算温度から、午前10時及び午前8時の計算地表面温度分布図を得た。それぞれについて、面積平均して1メッシュ990m×990mの計算地表面温度分布図を得た(図6(a)、(b))。

4. リモセンによる輝度温度

雲の影響のほとんどなかった日(1988年4月15日)を選び、LANDSAT TMデータ及びNOAAデータを用いて解析を行った。LANDSAT TMの観測時刻は午前10時、NOAAは午前8時であった。解析範囲は、北緯33度45分から南に40km、東経130度10分から東に40km(福岡市及びその周辺)である。LANDSAT TM BAND 1~5,7(分解能30m)より被覆分類図を得た。地表面状態のトレーニング領域を多数抽出した後、分離度の小さいものを削除した。またトレーニングデータの各点を最尤法分類し、自分自身に分類される割合が低いものを削除した。残ったトレーニングデータ(64個)を用いて、解析範囲について最尤法分類を行なった。さらに、分類した地表面状態を16種類のカテゴリーにまとめた。BAND 6(10.4~12.5μm、分解能120m)より輝度温度分布図を得た。LANDSAT TMの輝度温度変換は、公表されている観測温度幅(200~340K)についてのBAND 6のデータと温度の関係をj用いて行なった。面積平均して1メッシュ990m×990mの輝度温度分布図を得た(図6(c))。また、NOAA BAND 4(10.3~11.3μm、分解能直下点で約1.1km)より輝度温度分布図を得た。NOAAの輝度温度変換についても、公表されている係数を用いて行なった。面積平均して1メッシュ約1km×1kmの輝度温度分布図を得た(図6(d))。

5. 熱収支モデルによる計算温度とリモセン輝度温度との比較

5.1 各カテゴリーの計算温度とLANDSAT TM輝度温度の頻度分布との関係

熱収支モデルを用いて求めた地表面温度の意味を調べるため、被覆分類カテゴリーごとのLANDSAT TM

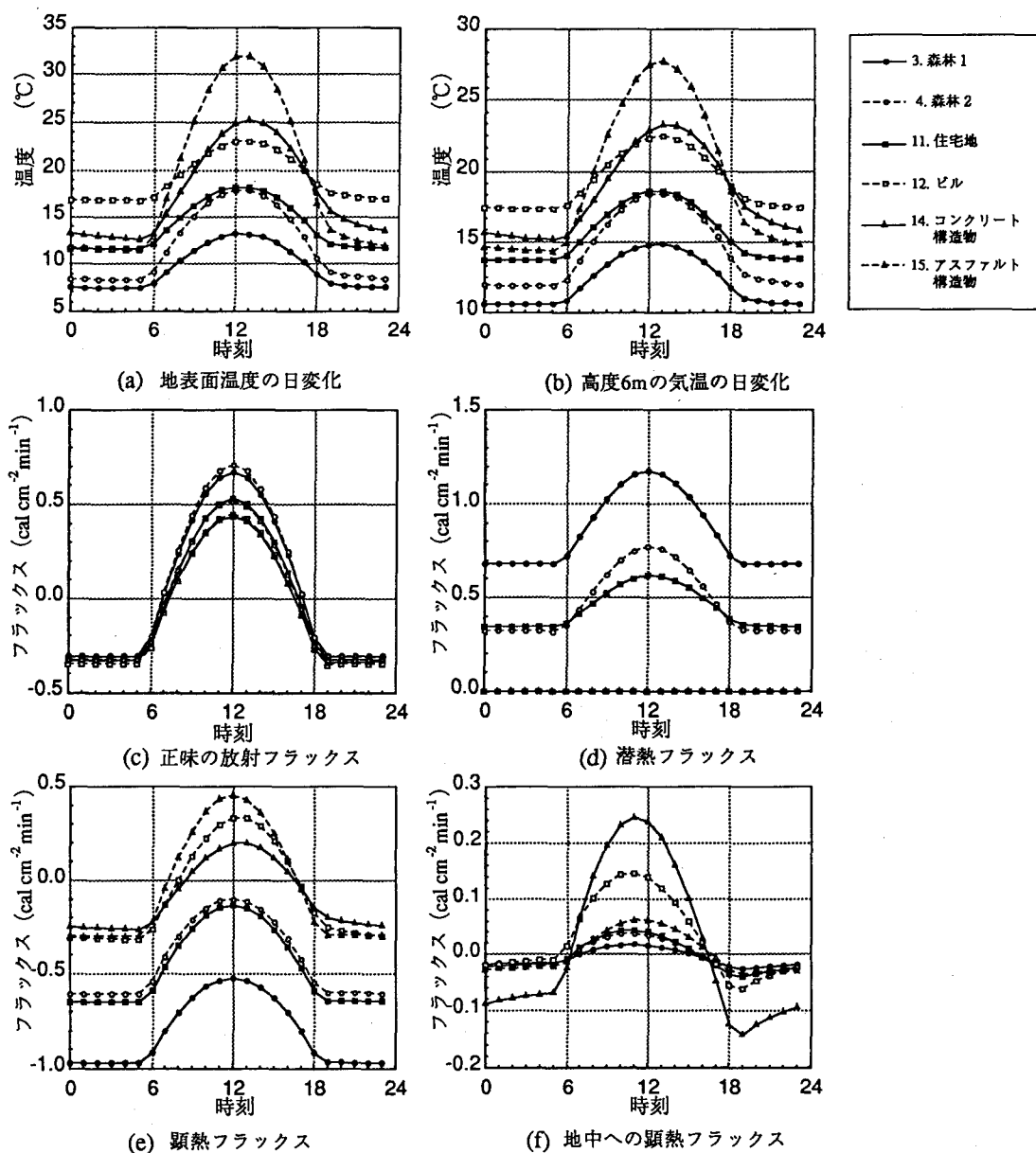


図5 計算温度と各フラックスの日変化

輝度温度の頻度分布（中央値及び有意水準10%の限界値）とカテゴリーごとの計算温度とを比較した（図7）。全般的に中央値と計算温度との一致は良いが、森林2（低く疎な森林）及び芝生、ビル、アスファルトについては差が大きい。また、水域、裸地、コンクリートについては、LANDSAT TM輝度温度の頻度分布そのものの幅が広く、計算温度と輝度温度とを比較する上で誤差を増大させる原因となる。

5.2 計算温度とリモセン輝度温度との比較

海域を除いた解析範囲について、午前10時の計算地表面温度及びLANDSAT TM輝度温度と、午前8時の計算地表面温度及びNOAA輝度温度のそれぞれとの相関を調べた。LANDSAT TM輝度温度と計算温度との比

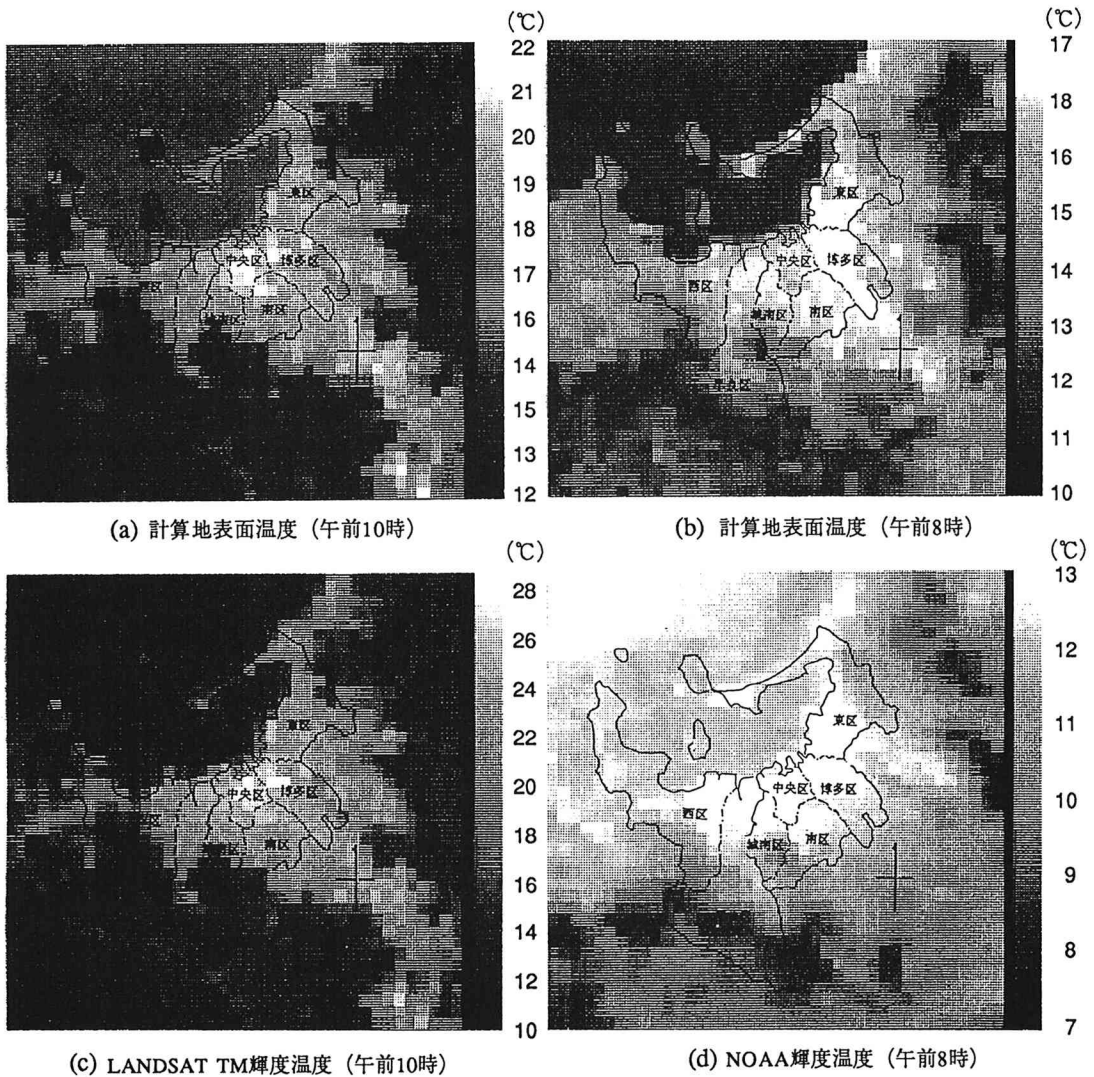


図6 1988年4月15日の温度分布図

較では、図8(a)に示すような相関 ($R=0.857$) が得られた。絶対値では計算温度の方が全般的に低い値となった。NOAA輝度温度と計算温度との相関は図8(b)に示すようにあまり良くなかった。これは、地点による温度の違いがNOAA輝度温度で見て7~13℃と小さく、地点ごとの土地被覆状態の差による効果が十分現われていないためと考えられる。また、計算温度分布図は1メッシュ990m×990mであるのに対して、NOAA輝度温度分布図は1メッシュが約1km×1kmであり、正確には対応していないことも一因と考えられる。

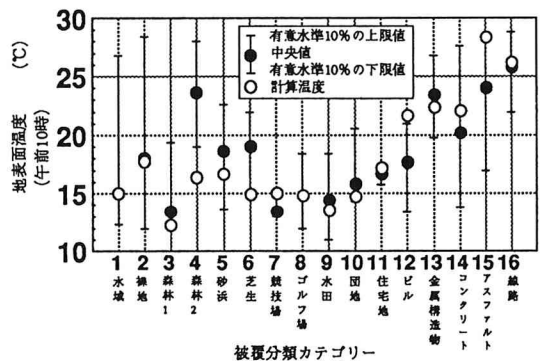
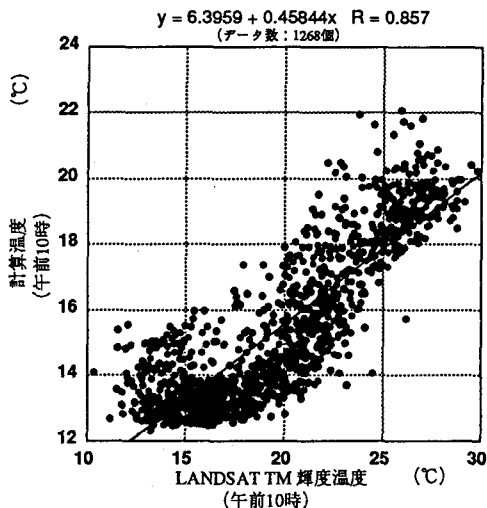
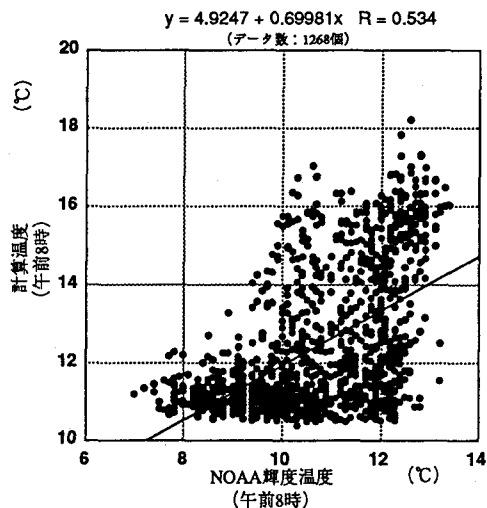


図7 各カテゴリーごとのLANDSAT TM輝度温度の頻度分布と計算温度との比較



(a) LANDSAT TM輝度温度と計算地表面温度との相関



(b) NOAA輝度温度と計算地表面温度との相関

図8 リモセン輝度温度と計算地表面温度との相関 (1988年4月15日)

6. 結論

本研究では、まず、(1)Atwaterの熱収支モデルを使って、地表面パラメータ及び人工排熱、上空境界の風速、移流の変化に対する計算温度の変化を定量的に調べた。次に、(2)熱収支モデルによる計算温度とLANDSAT TM及びNOAAから得られる諸情報とを組み合わせることによって、計算地表面温度とリモセン輝度温度とを比較し、その関連づけを試みた。(3)午前10時の計算地表面温度とLANDSAT TM輝度温度との比較においては、以前の結果^{[1][2]}よりも良い相関が得られた。これは、雲のないリモセンデータを用いたこと、被覆分類のカテゴリー数を多くしたこと等によると考えられる。(4)午前8時の計算地表面温度とNOAA輝度温度との比較では相関はあまり良くなかった。この原因としては、対象としたケースでは、地点による温度の違いが小さく、地点ごとの土地被覆状態の差による効果が十分に現われていないこと、計算温度と輝度温度とのメッシュサイズが完全には一致していないことなどが考えられる。

計算温度とリモセン輝度温度との絶対値の差については、輝度温度そのものの意味解釈の問題がある。微視的にはかなり複雑な分布をしている実際の温度をある面積で平均化していることも問題である。また、基本的な問題として、広い平地で適用される大気境界層モデルを都市域に適用することの限界及び計算において移流項を無視したことの問題もある。なお、パラメータ設定の改善による計算結果の向上と、今回の研究では評価しなかった計算温度と実測温度との関係については、今後さらに検討したい。

以上のように、熱収支モデルとリモセンデータを用いることによって、計算温度とリモセン輝度温度とを比較・検討した。この結果、ヒートアイランドの空間的分布に及ぼす地表面状態の役割について、ある程度定量的に説明することができた。

《参考文献》

- [1] 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.
- [2] 瓜生良知, 上野賢仁, 井村秀文: 環境システム研究, Vol. 19, pp. 83~88, 1991.
- [3] Atwater, M. A. : Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 3, pp. 229~245, 1972.
- [4] 原田朗: 大気汚染と気候の変化, 東京堂出版, p. 33, 1986.