

都市の熱環境に関する研究 (その3)

九州大学工学部 学生員○森圭太郎 学生員 瓜生良知
学生員 上野賢仁 正 員 井村秀文

1. はじめに

都市への人口や経済活動の集中につれ、高層ビル化、コンクリート化、緑地の減少などの都市特有の地表面の改変(物理的特性の変化)が行なわれる。その結果、湿度の低下による乾燥化、夜間放熱の増大などにもなって、ヒートアイランド現象といわれる都市気候の変化が生じている。一方、都市が巨大になるにつれて冷暖房や自動車交通のため都市内のエネルギー消費は増大し、ヒートアイランド現象を助長させるようになる。環境的に住みやすく地球に優しい都市をつくりあげ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ていく必要がある。このためには、都市の物理的構造・気象条件・人工熱などと熱環境との関係を明らかにし、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。本研究では、都市の温度を *Atwater* の熱収支モデルを用いて計算し、地表面の特性による影響について検討する。

2. 熱収支モデル

モデルは一次元で考えることとし、ある地点を鉛直方向に3つの空間に分け、それぞれを大気・地表面・地中とする(図-1)。まず、一次元の熱収支モデルを用いる際の前提条件として以下の点を仮定する。

- (1) 風の移流を無視する。
- (2) 大気は中立状態であるとする。
- (3) 全ての気象条件と地中のパラメータは水平方向には均一とする。
- (4) 雲や空中の汚染物などの影響は考慮しない。

大気については *Atwater* による一次元熱収支モデルを用いる。

基礎式を次に示す。

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

この式を用いて大気中の変数を求める。変数 X_i には、北向きの風速、東向きの風速、比湿、温度の4つを与えて上式をとく。すなわち、次の4つの式になる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_1 (R_i, z) \frac{\partial u}{\partial z} \right] + f v - f v_g \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_1 (R_i, z) \frac{\partial v}{\partial z} \right] + f u_g - f u \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_2 (R_i, z) \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \right] \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_3 (R_i, z) \frac{\partial q}{\partial z} \right] \quad \dots (5)$$

次に、地中の温度(地温)は、次式の熱拡散方程式を用いて求める。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \dots (6)$$

最後に地表面温度を次の熱収支式により求める。

$$0 = R_N - LE - A - S + RM \quad \dots (7)$$

ただし、上式右辺の各項は次のように表される。

$$R_N = (1 - a) Tr R_0 \left[\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma \right] - \epsilon \sigma T_{ls}^4 \quad (8)$$

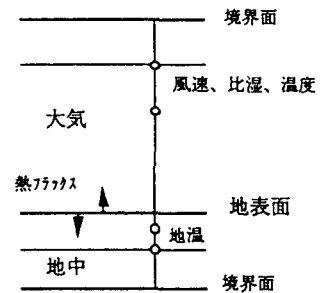


図-1 モデルの概要

X_i : 変数(風速、温度、比湿)
 R_i : リチャードソン数
 K_i : 拡散係数
 A_i : 発生項

f : コリオリのパラメータ
 u_g, v_g : 境界上端の風速
 K_1 : 運動量の渦拡散係数
 K_2 : 顕熱の渦拡散係数
 K_3 : 水蒸気の渦拡散係数

K_s : 土の熱拡散係数

R_N : 太陽による入射フラックス
 LE : 潜熱フラックス
 S : 地中へのフラックス
 A : 顕熱フラックス
 RM : 人工排熱

$$LE = -L\rho K_e \frac{\partial q}{\partial z} \dots (9)$$

$$A = -\rho C_p K_e \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \dots (10)$$

$$S = C K_s \frac{\partial T_d}{\partial z} \dots (11)$$

Γ : 乾燥断熱減率	ϕ : 緯度
T_r : 大気の透過係数	γ : 時角
R_0 : 太陽定数	δ : 赤緯
σ : ステファンボルツマン定数	L : 水の潜熱
C : 土の熱容量	Δt : 分割時間
ρ : 空気密度	a : アルベド
C_p : 空気の比熱	Z_0 : 粗度長
ϵ : 放射率	M : 蒸発能

表-1 境界条件

上空	東向きの風速: 0cm/s
	北向きの風速: 600cm/s
	温度: 267 K
	比湿: 0.0015
地下	地温: 285 K

計算は、大気・地中をいくつかのグリッド(格子)で区切り、差分法により各グリッドにおけるそれぞれの変数を求め、続いて地表面温度を4次方程式を解くことにより求める。なお、大気の上端、及び地中の下端においては境界条件としてそれぞれの変数(上端においては風速・比湿・温度、下端においては地温)は一定値とする。なお、大気上端 2000m、地中下端 0.2m までを計算領域とした。計算地点の緯度は 33.58 度、赤緯は 9.77 度としている。境界条件を表-1 に示す。計算は、24 時間を一周期として、各グリッドでの温度の日変化が定常となるまで繰り返し行なった。

3. 計算結果及び考察

アルベド、粗度長(cm)、蒸発能をパラメータとして、地表面温度(0m)と地上から6mの温度に着目して感度解析を行なった。ここでは、各々のパラメータの値を変化させるときのそのほかのパラメータは、アルベド 0.2、粗度長 100cm、蒸発能 0.2 としている。まず、図-2 にアルベドを変化させたときの結果を示す。アルベドが 0.5 を境にして地表面温度と 6m の温度とが逆転している。これは、地表面での反射率が大きいために太陽エネルギー吸収量が小さく長波放射による温度低下が大きいことによる。図-3 は粗度長による影響を示したものであるが、粗度長を大きくするにつれて温度が低下することがわかる。図-4 では蒸発能の増加によって温度が下がることがわかるが、温度低下の勾配はしだいに小さくなっている。以上のことより、これらの各パラメータの温度変化に対する影響は、アルベドによる影響が一番大きいことがわかる。次に、先に示した各パラメータのときの午後 2 時と午前 2 時の気温の鉛直分布図を図-5 に示す。午前 2 時の鉛直分布には、上空数メートルの点で気温の逆転現象が現われている。これは、雲などの影響を全く考えなかったために放射冷却の効果が顕著に現われた結果と考えられる。今回のモデルは、都市内のようにパラメータが細かく分れた地域では、面積平均したパラメータを用いなければならないため、また、水平方向の影響を無視できないために微小スペースでの適用には問題がある。しかしながら都市と郊外の代表的なパラメータを設定することにより、両者の温度を簡易に比較できる点において有効なモデルである。

<参考文献>

A. Atwater : Thermal Effects of Urbanization and Industrialization in the Boundary Layer: A Numerical Study, Boundary- Layer Meteorology, 3, pp.229-245, 1972.

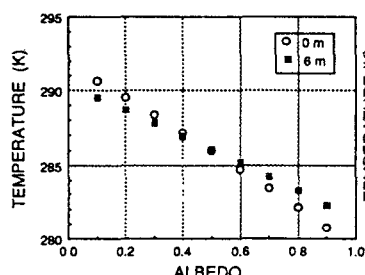


図-2 アルベドの影響

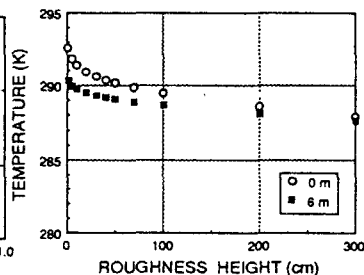


図-3 粗度長の影響

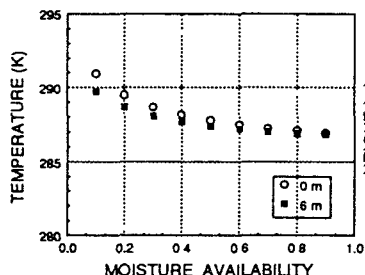


図-4 蒸発能の影響

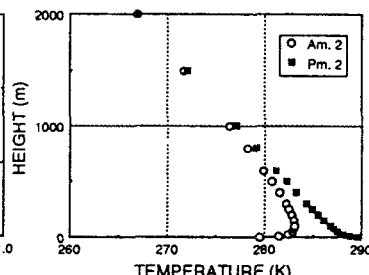


図-5 鉛直温度分布