

三次元クロージャーモデルによる都市熱環境構造の解析 —福岡市周辺地域への適応—

AN ANALYSIS OF URBAN THERMAL ENVIRONMENT BASED ON THE THREE-DIMENSIONAL TURBULENCE CLOSURE MODEL : A CASE STUDY OF FUKUOKA CITY

大濱隆司*・金子慎治**・上野賢仁***・井村秀文**

Takashi OHAMA*, Shinji KANEKO**, Takahito UENO***, Hidefumi IMURA**

ABSTRACT; In order to investigate technical possibilities to mitigate thermal environmental conditions in urbanized areas, this study conducts a numerical simulations based on the three-dimensional turbulence closure model of Mellor and Yamada (1974). Taking Fukuoka City as an area of case study, it analyzes the relationship between physical peculiarities of the city and its area-wide temperature distribution. Model calculations are carried out under suitable boundary conditions corresponding to the actual situation in the chosen area. The simulation can reproduce the basic thermal characteristics of the area, showing a fairly good correlation between calculated ground temperature values and the brightness temperatures obtained by remote sensing data (LANDSAT TM). Possible atmospheric temperature changes caused by hypothetical land reclamation in Hakata Bay and the construction of an inland green-belts are also tested.

KEYWORDS; urban thermal environment, heat island, numerical simulations, turbulence closure model, LANDSAT TM

1. はじめに

都市の物理構造の改変にともなう都市特有の熱環境の現状把握と要因分析が、様々な手法で行われている。その際、地形や都市化の程度など地域性の高い要因が都市の熱環境を支配するため、それぞれの地域での熱環境の解析が重要である。本研究では、大気乱流モデルとしてMellor and Yamada (1974)¹⁾のレベル2モデルに準じた三次元クロージャーモデルを採用し、福岡市周辺の熱環境を解析する。この際必要となる地表面パラメータは、LANDSAT TMから求めて与える。また、午前10時における計算温度とLANDSAT TMの輝度温度との比較により、モデルの現実再現性を評価する。次に、計算による福岡市周辺の気温分布の日変化について考察し、熱環境の地域特性を明らかにする。また、本モデルを用いた地域的な熱環境の将来予測の一例として、博多湾の海岸部の埋立及び内陸のグリーンベルトの設置による気温分布の変化を予測する。

2. クロージャーモデルの概要

モデルは三次元で取り扱い、地点ごとを鉛直方向に3つの空間に分け、それぞれを境界層、接地層、地中とする。また、境界層における基礎方程式系は2次の乱流クロージャーモデル²⁾であり、以下の前提条件を仮定する。

1) 地中及び上空の境界条件は日変化しないものとする。

* 九州電力 Kyushu Electric Power Company

** 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

*** 熊本工業大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Kumamoto Institute of Technology

- 2) 雲や空中の汚染物質などの影響は考慮しない。
- 3) 乱流エネルギーの生成と消滅は局所平衡にある。
- 4) 静力学平衡が成立するものとする。

2.1 鉛直座標変換

福岡市は、周囲を山地に囲まれており、そこでの気象には地形条件が大きく影響することが予想される。従って本モデルでは地形による影響を反映させるため、Yamada(1981)³⁾に従って以下のように鉛直座標の変換を行う。

$$z^* = \bar{H} \frac{z - z_g}{h} \quad (1) \quad h = H - z_g \quad (2)$$

ここで、 z は直交座標系の鉛直座標、 z^* は座標変換後の鉛直座標、 z_g は標高、 h は座標変換後の計算領域上限、 H は直交座標系での計算領域上限である。また、簡単のため H は次式で与える。

$$H = \bar{H} + z_{g\max} \quad (3)$$

ここで、 $z_{g\max}$ は、計算領域内の最大標高である。実際の計算では、先に z^* を決定し、それによって直交座標系の鉛直座標を定めることとなる。

2.2 境界層について

上空3500mまでの風速 U , V , W , 比湿 q , 温位 θ 及び気圧 p を次式より求める。

<流体方程式>

$$\frac{dU}{dt} = f(V - V_g) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial}{\partial x} (hU) \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial}{\partial y} (hU) \right) + \left(\frac{\bar{H}}{h} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial U}{\partial z^*} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dt} = -f(U - U_g) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial}{\partial x} (hV) \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial}{\partial y} (hV) \right) + \left(\frac{\bar{H}}{h} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial}{\partial x} (hq) \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial}{\partial y} (hq) \right) + \left(\frac{\bar{H}}{h} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial}{\partial x} (h\theta) \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial}{\partial y} (h\theta) \right) + \left(\frac{\bar{H}}{h} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\bar{H}}{h} \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_p}{\partial z^*} \quad (7)$$

ここで、

$$W^* = \frac{\bar{H}}{h} W + \frac{z^* - H}{h} \left(U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (h \cdot) + V \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (h \cdot) + W^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (9)$$

なお、 U_g, V_g は地衡風成分で、次の式で計算する。

$$U_g = \frac{U(\bar{H})\langle\theta\rangle}{\theta(\bar{H})} + g \frac{H - z_g}{f\bar{H}} \int_{z_g}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle\theta\rangle} \frac{\partial \Delta\theta}{\partial y} dz - \frac{g}{f\bar{H}} \frac{\partial z_g}{\partial y} \int_{z_g}^{\bar{H}} \frac{\Delta\theta}{\langle\theta\rangle} dz + g \frac{H - z^*}{f\bar{H}} \left(1 - \frac{\langle\theta\rangle}{\theta} \right) \frac{\partial z_g}{\partial y} \quad (10)$$

$$V_g = \frac{V(\bar{H})\langle\theta\rangle}{\theta(\bar{H})} - g \frac{H - z_g}{f\bar{H}} \int_{z_g}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle\theta\rangle} \frac{\partial \Delta\theta}{\partial x} dz + \frac{g}{f\bar{H}} \frac{\partial z_g}{\partial x} \int_{z_g}^{\bar{H}} \frac{\Delta\theta}{\langle\theta\rangle} dz + g \frac{H - z^*}{f\bar{H}} \left(1 - \frac{\langle\theta\rangle}{\theta} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} \quad (11)$$

<静力学方程式>

$$\frac{\bar{H}}{h} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p}{p_0} \right) \frac{R}{C_p} = - \frac{g}{C_p \theta} \quad (12)$$

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (hU) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (hV) + \frac{\partial W^*}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

ここで K_v, K_θ は、それぞれ運動量、温位の拡散係数であり、それぞれ次式を用いた。

$$K_v = 4.08 l^2 \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} (1 - R_f)^{1/2} \tilde{S}_m^{3/2} \quad (14)$$

$$K_\theta = 4.08 l^2 \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} (1 - R_f)^{1/2} \tilde{S}_h \tilde{S}_m^{1/2} \quad (15)$$

$$\tilde{S}_m = 1.96 \frac{(0.1912 - R_f)(0.2341 - R_f)}{(1 - R_f)(0.2231 - R_f)} \quad (16) \quad \tilde{S}_h = 2.58 \frac{(0.1912 - R_f)}{(1 - R_f)} \quad (17)$$

$$R_f = 0.6588 \{ R_i + 0.1776 - (R_i^2 - 0.3221 R_i + 0.03156)^{1/2} \} \quad (18)$$

$$R_i = \frac{H - z_g}{H} \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (19) \quad l = \frac{H - z_g}{H} \frac{kz}{1 + (1 + kz^2)/100} \quad (20)$$

なお、 K_h は水平方向の拡散係数であり次式で与える。

$$K_h = 0.52 \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} \right]^{0.5} \quad (21)$$

2.3 接地層について

次の熱収支式を用いて地表面の温度 T_s 、比湿 q_s を求める。なお、無次元プロファイル関数 $\Psi_{m,h,e}$ は粗度長 z_0 とフラックスリチャードソン数 R_f の関数である。ここで、 $\Psi_{m,h,e}$ の関数形は近藤の式⁴⁾を用いた。

$$(1 - \text{ref}) S^\downarrow - (\sigma T_s^4 - R_n) = H_s + LE + G \quad (22) \quad u_* = \frac{kU}{\Psi_m} \quad (23)$$

$$H_s = C_p \rho \frac{k u_*}{\Psi_h} (\theta_s - \theta) \quad (24) \quad LE = L \rho \frac{k u_*}{\Psi_e} (q_s - q) \quad (25)$$

$$G = C K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (26) \quad S^\downarrow = T_n I_0 (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma) \quad (27)$$

U: 東向きの風速, V: 北向きの風速,
W: 鉛直方向の風速, f: コリオリ因子,
g: 重力加速度, q: 比湿, T: 温度,
 $\theta = T(p/p_0)^{R/C_p}$: 温位, p_0 : 標準気圧,
p: 気圧, R: 気体定数, C_p : 大気の比湿,
 ρ : 大気の密度, R_f : リチャードソン数,
 R_f : フラックスリチャードソン数,
 R_n : 正味放射, $\langle \cdot \rangle$: 水平方向の平均値,
 $\Delta x, \Delta y$: 各方向の格子間隔, H_s : 顕熱,
LE: 潜熱, $S^\downarrow$: 太陽入射, G: 地中伝導熱,
 σ : ボルツマン定数, T_s : 地中の温度,
 T_s : 地表面温度, q_{sat} : 飽和比湿, C: 熱容量,
 $q_s = (1 - \beta) q + \beta q_{sat}(T_s)$: 地表面比湿,
 θ_s : 地表面温位, k: カルマン定数, β : 蒸発能,
 I_0 : 太陽定数, ϕ : 緯度, δ : 赤緯, γ : 時角,
 T_n : 透過率, ref: アルベド, z_0 : 粗度長,
 $\Psi_{m,h,e}$: 無次元プロファイル関数,
 K_s : 熱伝導係数, $\Delta \theta = \theta - \langle \theta \rangle$,
 $h = H - z_g$: 鉛直方向の計算領域,
z: 直交座標系の鉛直座標,
 $z^* = \bar{H}(z - z_g)/h$: 座標変換後の鉛直座標,
 z_g : 標高, H : z^* の上限値, H : z の上限値

図1 変数の説明図

2.4 地中について

次の熱伝導方程式を用いて、地中25cmまでの温度 T_g を求める。

なお、図1に、用いた変数をまとめて示す。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) \quad (28)$$

3. 解析手法

3.1 数値解法の概略

本モデルにおける差分式の解法として、大気流体についてはADI法²⁾、地中及び地表面については陰解法を用いた。また、座標変換後の鉛直座標 z^* の格子長を図2に示す。シミュレーション開始の時刻は午前0時とし、30秒の積分時間間隔で48時間の繰り返し計算を行い、初期条件の影響の少ない後半の24時間を計算結果として用いた。温位の初期条件は、地表面で一様に280Kを与え、夜間の典

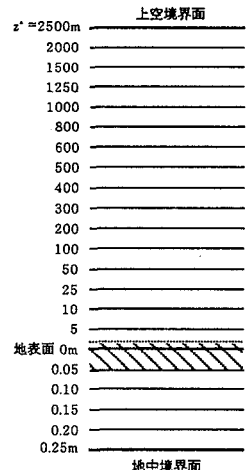


図2 座標変換後の鉛直格子点

型的な温位の鉛直分布を参考にして、鉛直方向では上空境界値との間に直線的に与えた。また、水平方向はそれぞれの値を一樣に与えた。地中については境界値を初期値として一樣に与えた。

3.2 解析対象

解析対象は福岡市周辺40km×40kmの範囲（水平メッシュ約1km）を選定した。この際、北西端の始点は東経130度10分、北緯33度45分とする。また、対象日はLANDSAT撮影日と同じ1988年4月15日を選んだ。なお、撮影時刻は午前10時である。解析範囲の等高線図を図3に示す。

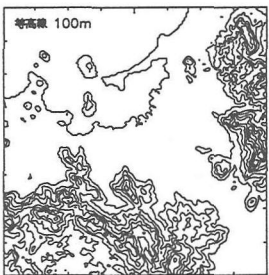


図3 解析範囲の等高線図

3.3 地表面パラメータ

まずLANDSAT TMデータの最小単位の画素（約30mメッシュ）の被覆状態を代表的な16種のカテゴリーに分類した。次に文献値を参考にし、各カテゴリー毎の地表面パラメータ値（ A_n ）を設定し表1にまとめる⁵⁾⁶⁾。ここでLANDSAT TMデータを1kmメッシュに区切り、各メッシュ内に16種のカテゴリーがそれぞれ何個ずつ含まれているか（ m_n ）を求める。そこで、次式に従いメッシュごとに平均化した地表面パラメータ（ $\bar{A}$ ）を式（29）に従い求めた。粗度長についても、他のパラメータと同様に加重平均値によって設定した。

なお、約1km²程度の範囲を対象とした場合の粗度長の値の設定については、国土数値情報によって細分化された被覆分類を基にした実験式⁷⁾などが提案はされているが、方法的にはまだ必ずしも確立されていない。このため、本研究においては、LANDSATデータを利用する場合の便宜的な方法として上記の方法を用いることにした。

$$\bar{A} = \frac{\sum_{n=1}^{16} m_n A_n}{\sum_{n=1}^{16} m_n}$$

(29)

表1 地表面パラメータ

カテゴリー	アルベド ref	粗度長 z_0 (m)	熱容量 C (10 ⁶ J/m ² K)	蒸発能 β	熱拡散係数 K (10 ⁻⁶ m ² /s)	地中温度 T_g (K)
水域	0.10	0.0001	4.20	1.0	0.14	289
裸地	0.30	0.01	3.10	0.4	0.74	285
森林1	0.25	1.0	3.24	0.9	1.74	285
森林2	0.30	0.1	3.15	0.5	0.94	285
砂浜	0.35	0.0003	3.10	0.4	0.74	285
芝生	0.30	0.005	3.10	0.6	0.74	285
競技場	0.30	0.05	3.10	0.5	0.74	285
ゴルフ場	0.30	0.05	3.10	0.5	0.74	285
水田	0.25	0.01	3.82	0.9	0.43	285
団地	0.30	1.5	2.51	0.3	0.57	285
住宅地	0.35	1.0	2.88	0.2	0.61	285
ビル	0.30	3.0	2.11	0.0	0.53	290
金属構造物	0.20	1.0	2.90	0.0	1.36	290
コンクリート	0.30	0.03	2.11	0.0	0.53	290
	0.20	0.03	2.18	0.0	0.07	290
アスファルト	0.10	0.01	2.35	0.0	0.72	290

なお、海域の熱拡散係数は、乱流拡散が発生するとし 0.6×10⁻⁶m²/sとした。

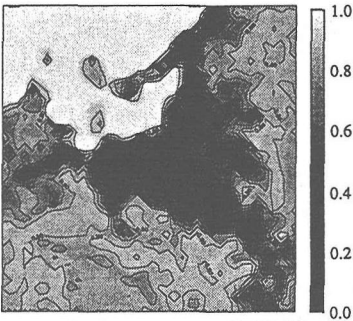


図4 地表面パラメータ（蒸発能）

以上の方法で設定した地表面パラメータの内、蒸発能について設定した結果を図4に示す。

3.4 境界条件

地表面で風速は0になるとし、計算領域側面については水平方向の微分項を0とした式を用いた。なお地中25cmでの境界温度は、地表面の被覆状態によって変化することが予想されるため、地表面パラメータと同時に与えることとした（表1）。また解析範囲内の最大標高は900m前後であり、計算領域上限は3500mとした。福岡管区気象台

表2 境界条件

東向きの風速U	0m/s
北向きの風速V	0m/s
比湿q	5.194×10 ⁻⁴ kg/kg
温位θ	301.460K
気圧p	65321Pa

の高層観測データより決定した境界値を表2に示す。ここで、当日の気圧配置から地衡風を決定することが困難であり、また、風向・風速の境界値として一日を通して一定値を与える都合上、地衡風は無いものとした。

4. 計算結果及び考察

4.1 輝度温度と計算地表面温度の比較

都市の熱環境解析の視点からモデルの整合性を評価する際、計算温度と実測値との比較・検討を行う必要がある。しかし一般に、任意の時刻の細密な温度分布を実測として得ることは困難である。従って本研究では、計算温度と実測値の特定時刻の細密温度分布の比較・検討を行った。図5はLANDSATから求めた輝度温度分布図、図6は午前10時の計算地表面温度である。ここで図5と図6を比較すると、計算地表面温度の分布形状は輝度温度のものと類似しており、本モデルが温度分布の特性をよく再現しているといえる。福岡都市圏は海岸に面した天神地区（都心部）を底辺の中心とし、南東方向の太宰府を頂点としたほぼ三角形に都市化が進んでいる。また東側には三郡山地（標高936m）南側には脊振山地（標高1055m）を配している。し

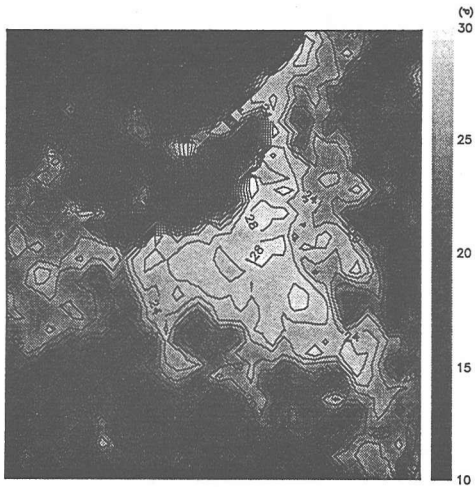


図5 午前10時の輝度温度

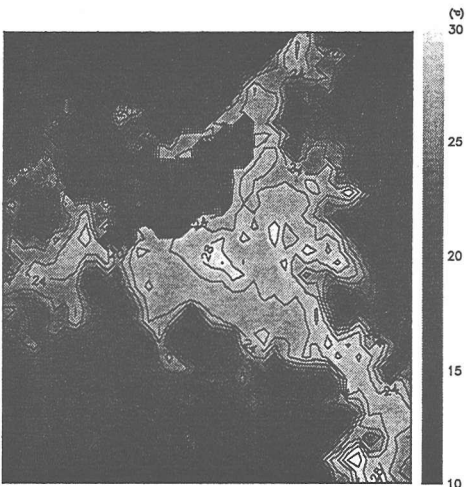


図6 午前10時の計算地表面温度

たがって、図3の100mの等高線と20℃の等温線が類似していることから、福岡市周辺における開発がほぼ山の麓まで行われていることがわかる。ここで各地点の計算地表面温度の実実再現性を調べるため、輝度温度と対応する計算地表面温度との相関を求めた（図7）。その結果、比較的良好な相関係数($R=0.898$)が得られ、多くの地点で完全相関線近傍に集中していることから、計算地表面温度と輝度温度は概ね一対一で対応していると言える。しかし、計算地表面温度が輝度温度に対して4~5℃程度高い地点が存在する。図5、図6の比較により、海域と砂浜、山地と水田、住宅地と裸地など、異なった被覆特性が同一メッシュ内で、同程度共存しているような地点において計算結果のズレがみられる。このことは、本モデルでは再現できない影響要因について、地表面パラメータの設定の問題も含め、地表面付近での詳細なモデル化を必要とする領域が存在することを示す。

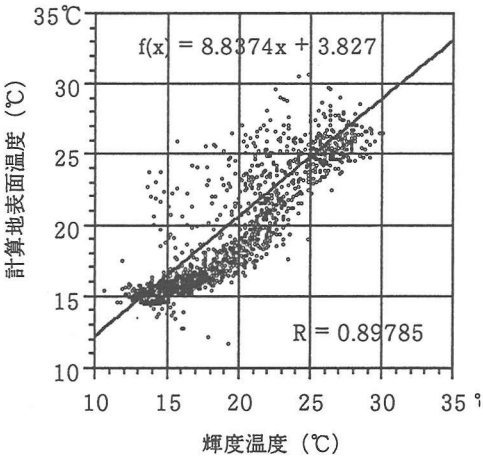


図7 相関図

4.2 計算気温の時間変化に関する考察

次に、福岡市周辺部の気温分布の時間変化を考察する。午前10時、午後12時の気温・風速分布を図8、図9に示す。なお、気温は高度1.5m、風速は高度6.5mの分布を用いた。また図中のポイントはAMeDASの観測点を表す。地表面温度の分布については地表面の被覆状態の違いによって地点差ごとに明瞭な差が出ている。気温分布の地点差は地表面のそれと比べれば小さい。また都心部を中心として、均一に平野部全体に高温域が発達している。風の場を見ると斜面付近で水平方向の風速が減少しており、斜面に沿って上昇流が発生している。そこで、いくつかの断面を調べてみると、その温位分布から、日中の混合層の発達を確認できた。したがってこれらの地点では、周囲の山によって熱の移動が遮られ、暖かい空気が淀んでいることが分かる。このことから、気温は地表面温度と異なり、地表面の被覆状態だけで決定されるものではなく、地形の効果や周りの温度など、様々な要因で変化するものと解釈できる。午後12時の気温分布を午前10時の気温分布と比較してみると、都心部の高温域の中心が、南東の方向に移動していることが分かる。これは、熱が海風によって風下に運ばれ、山地の影響で太宰府周辺に至ったからと考えられる。このことから福岡市周辺の熱環境は、山の影響を強く受けていることが分かる。

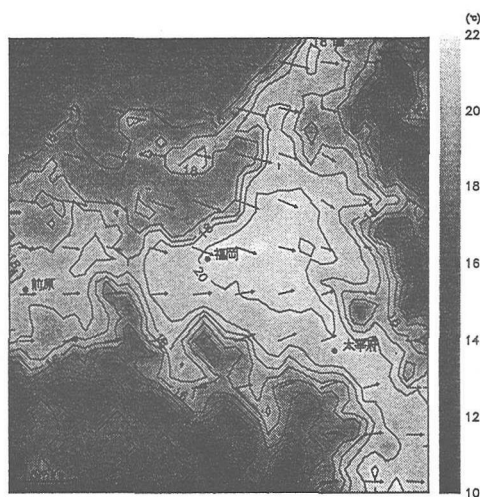


図8 午前10時の気温と風向風速

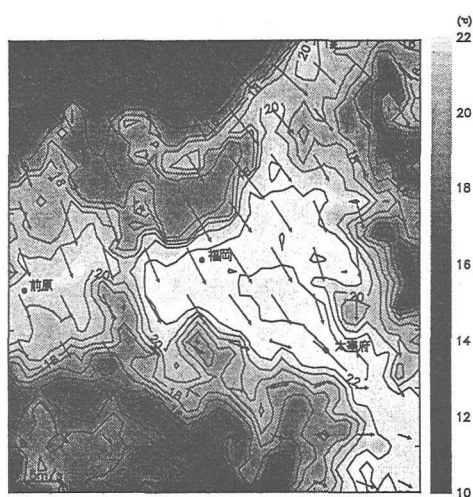


図9 午後12時の気温と風向風速

4.3 モデルの検証

本モデルでは、対象地域全体に着目した大局的な特性についてはかなり良好な結果が得られた。すなわち、輝度温度と計算地表面温度の比較において、細密な計算地表面温度分布のパターンをかなり良好に再現できていることが確認できた。また、計算気温の時間変化に関して、山地の斜面部で風向・風速（上昇流）及びそれに連動した温位分布から、日中の混合層の発達を確認できた。さらに、日中の海陸風の変化を再現し、その影響により都心部の熱が風下（内陸）へ移動することが確認できた。以上から、福岡市周辺部での連続的な温度場および風の場を再現することが可能であるといえる。

しかし、個々の地点に着目した局所的な特性については、一致は必ずしも良好とは言えない。解析範囲内にある3点のAMeDASの観測局の気温と風向・風速との比較によってモデルの検証を行った結果、気温の日変化については総ての地点において、平均2~4℃の範囲で計算気温が高かった。特に、周辺に緑地の比較的多く存在する太宰府では、計算した最低気温が7℃も高くなっていることから、本モデルで再現できない植生の違いに起因する微細な気象変化による影響が大きいことが考えられる。また、各地点ごとの風向・風速の値についても、一致はあまりよくなかった。つまり、海陸風の発達について、計算結果と観測値との間にはまだ時間的なズレが生じている。この原因としては、まず、局所的な風向・風速に対して、1km程度のメッシュでのシミュレーションでは再現困難であることが考えられる。また、藤野ら⁸⁾によって指摘されている

ように、大局的な風の場による影響が考えられる。つまり、上空境界に一日を通して大局的な風の場が存在する場合には、本計算で与えた上空境界条件は適切でなかった可能性がある。局所的な気温については、地表面温度以上に風の与える影響が大きく、風の場の再現が重要であるといえる。

5. 地表面被覆の改変による影響

5.1 港湾埋立による影響

都市の港湾地域の埋立は、熱環境に大きな影響を与える。そうした検討の一例として、福岡市内の港湾地域を埋立・拡張した場合の気温変化のシミュレーションを試みる。ここで、仮想的な埋立範囲を海岸から5 kmとし、地表面パラメータは現在の港湾部の値を一樣に与えた。この際、総埋立面積は

45km²に及ぶ。図10、図11に午前10時と午後12時の計算気温分布を示す。都心部の高温域が、埋立地域から都心部にわたり広範囲に広がっている。図8及び図9との比較により、埋立地が都市のヒートアイランド現象の助長に寄与していることが確認できる。また、埋立地では、埋立前と比較して午前10時に約3℃、午後12時では約3.5℃の気温上昇が見られた。前述の通り、福岡市周辺では福岡市の都心部の高温域が、日中の海陸風の発達に伴い、風下の太宰府市方向へ移動する。すなわち、埋立地付近の高温化がもたらす影響の中で、地表面を改変したメッシュのみならず、風下側での移流による影響が大きいことが予想される。従って、この移動方向（図10、図11の直線方向）の気温断面をとり、埋立前後の気温差を比較すると、埋立地から風下側（南東側）の温度上昇が埋立前に比べて著しい。両時刻についての埋立前と埋立後の気温差と埋立地からの距離（断面に沿った方向）の関係を図12に示す。午前10時、午後12時共に埋立による影響のため、埋立地から陸側10km程度の範囲で0～1.2℃の範囲の気温上昇が確認できる。また、図12より午前10時に比べ午後12時の方が埋立の影響が大きいことから、日中の気温上昇に伴って埋立の影響が増大すると予想される。

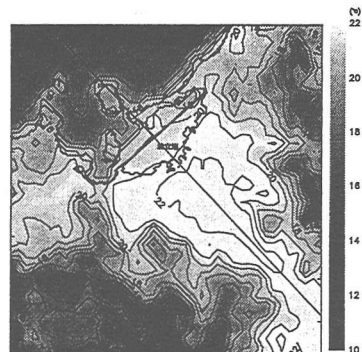
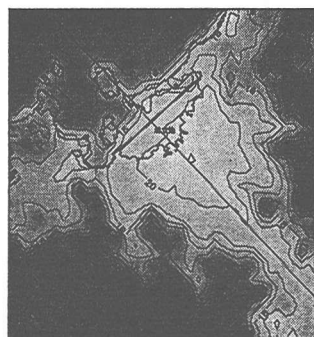


図10 埋立後の午前10時の気温分布

図11 埋立後の午後12時の気温分布

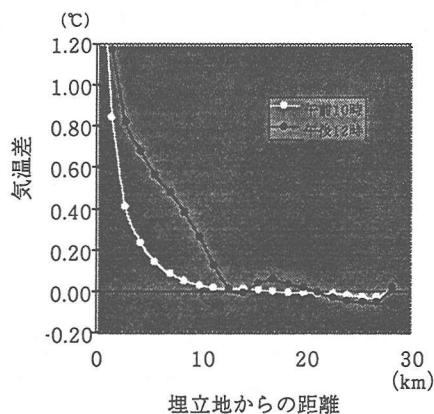


図12 埋立による風下側への影響

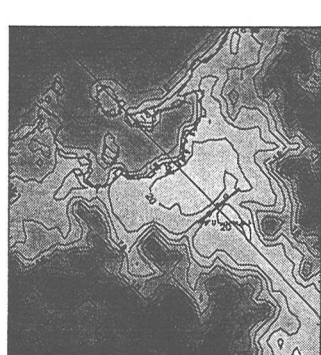


図13 グリーンベルト設置後の午前10時の気温分布

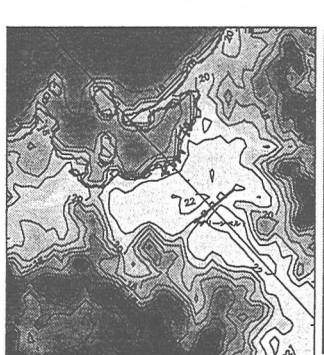


図14 グリーンベルト設置後の午後12時の気温分布

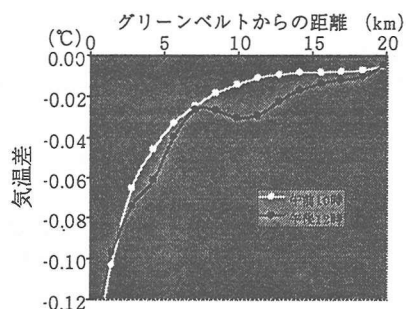


図15 グリーンベルト設置による風下側への影響

5.2 グリーンベルト設置による影響

都市の熱環境の改善方法の代表として、都市の緑化が挙げられる。そこで、福岡市と太宰府市との間（図13に示す位置）にグリーンベルトを設置した場合を想定し、それによる気温変化をシミュレーションする。ここでグリーンベルトは幅1km、長さ5kmで、地表面パラメータは山地の値を一様に与えた。図13、図14に計算によって得られた午前10時と午後12時の気温分布を示す。これらの図によれば、グリーンベルト化したメッシュでは気温上昇が抑制されているが、都市全体を眺めた場合には、これによる直接的な影響は比較的小さいと言える。そこで5.1と同様に、図13、図14に示すようなラインに沿って風の効果について検討した結果、図15に示すとおり、風下側で温度上昇が抑制されていることが確認できた。また、午前10時と午後12時を比較すると、気温上昇に伴いその効果は増大するといえる。抑制の効果は、グリーンベルト化したメッシュでの効果の1割程度と小さい。このことは、気温分布の支配要因として、その地点の被覆状態が大きく影響することを意味する。ただし、水平格子長に対してグリーンベルトの規模が小さいことから、近隣への影響を評価するために、より詳細なモデルによる局所的な解析が必要である。

6. 結論

福岡市周辺の熱環境解析のために、三次元クロージャーマデルを適用し、LANDSAT TMデータから求めた地表面パラメータを与えることによって、細密な気温分布を求めた。輝度温度と計算地表面温度の間にはある程度良好な相関が得られ、モデルの現実再現性が確認できた。また、気温の日変化を図示することによって、ヒートアイランドの形状の変化を視覚的に捉えることを可能とした。さらに、地表面被覆の改変として、博多湾の埋立及びグリーンベルトの設置を仮想的に想定し、それによる気温の変化を定量的に予測した。これは、熱環境を考慮した具体的な都市計画に対する一つの考察材料を提示したものである。

地点ごとの観測気温と計算気温の一致など、計算モデルをさらに改善する上での課題としては、

- 1) 植生の違いによる影響、キャニオン効果等の都市キャノピー特有の現象をより精密に再現可能とするような接地層モデルの構築
- 2) 異なる地表面被覆状態が共存するメッシュについて、より適切な地表面パラメータ（例えば、粗度長など）の設定
- 3) 流れの場をより適切に再現できるようなより適切な境界条件の設定（例えば、上空境界条件など）が挙げられる。

参考文献

- 1) Mellor, G. L. and T. Yamada : J. Atmos. Sci., Vol.31, pp.1791-1806, 1974.
- 2) 横山長之編：大気環境シミュレーション, pp.134-202, 白亜書房, 1992.
- 3) T. Yamada : J. Atmos. Sci. Japan, Vol.59, pp.108-122, 1981.
- 4) 近藤純正編：水環境の気象学, pp.106-107, 朝倉書店, 1994.
- 5) 上野賢仁ら：環境システム研究, Vol.20, pp.262-269, 1992.
- 6) Oke, T. R., : Boundary Layer Climates, Methuen & Co Ltd., 1978.
- 7) Kondo, J. and H. Tamazawa : Boundary Layer Meteor., Vol.35, pp.331-348, 1986.
- 8) 藤野毅ら：環境システム研究, Vol.22, pp.280-285, 1994.