

臨海部の開発が海風と都市熱環境に及ぼす影響に関する数値実験

EFFECT OF URBANIZATION IN A COASTAL REGION ON SEA BREEZE AND URBAN THERMAL ENVIRONMENT

河原 能久*, 川又孝太郎**, 玉井 信行*
Yoshihisa KAWAHARA*, Kotaro KAWAMATA**, Nobuyuki TAMAI*

ABSTRACT : Effect of land use development in a coastal region on heat island phenomenon is studied numerically by an urban climate model that employs the $k - \epsilon$ turbulence model and an eddy diffusivity model for the transport of momentum, temperature and moisture in the Eckman layer together with a heat balance model for the surface boundary layer and the soil layer. Numerical simulations are carried out for a simplified terrain which consists of sea and land. Changes in wind velocity, temperature and heat fluxes are discussed for three types of land use, that is, land surfaces are 1) covered by grass, 2) urbanized as residential area and 3) further developed in a coastal region as business center. It is clarified in the urbanized area that decrease of latent heat flux and increase of sensible heat flux at urban surface raise temperature in the daytime. Urban canopy intensifies sensible heat transfer, leading to higher air temperature. Sea breeze is blocked by the increased roughness in urbanized zone, resulting in the reduced cooling effect of sea breeze.

KEYWORDS : heat island, land use, thermal environment, sea breeze, urban climate model.

1. はじめに

人間活動が活発化し、開発が進むと環境に対してインパクトを与えるようになる。道路の舗装化、ビルの高層化、緑地の減少など地表面の改変が進みにつれ、エネルギー消費も増え、都市特有の気候であるヒートアイランド現象が顕在化してきている。この現象は社会経済活動の所産であるとともに、都市生活者に直接関わっている問題であるため、多くの人々の関心を集めている。また、ヒートアイランド現象は大気汚染物質の輸送にも影響を与えるために住民の住環境に多大の影響を及ぼす。

一方、我国では大都市の多くが海岸部に立地しており、都市気象を論ずる際には海陸風の影響を考慮することが必要である。また、東京湾に代表されるような大規模なウォーターフロント開発計画を有するところもある。このような開発に伴い、既存の都市域の熱環境は変質することが考えられる。

本研究の目的は臨海部の開発が後背地の都市の熱環境に与える効果を評価することにある。ここでは、臨海部の開発の影響について2次元非定常数値解析に基づき検討した結果を報告する。

ヒートアイランド現象の主たる要因として2つのことが挙げられる。第1は熱的要因であり、人工熱や地表面の熱的特性が変わることによる熱収支変化等である。第2は力学的要因であり、市街化に伴う粗度の増加に起因するメカニカルな乱流生成の増加である。これらの要因をより正確に捉えるために、本研究では乱流エネルギーとその消散率をもとにした乱流モデルを用いて解析するモデルを構築した。また、熱的要因をより精度よく評価するために、接地層の取扱いを精密化した。

2. 熱環境解析モデルの概要

大気境界層は接地層とその上方のエクマン層とに大別されるが、本研究ではそれぞれに対してモデル化を行った。モデルや数値解析法の詳細については川又(1994)を参照されたい。

2.1 エクマン層のモデル化

*東京大学, University of Tokyo
**環境庁, Environment Agency

一般に大気の状態は風速、気温、水蒸気、雲量及び圧力の分布をもって表現される。基礎方程式は物理量の保存則であり、Boussinesq 近似及び大気中での熱、水蒸気の生成と消滅は無視できると仮定している。

・連続式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

・運動量方程式

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\beta \Delta \Theta g_i - \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j} + \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) - 2\epsilon_{ijk} \Omega_j U_k \quad (2)$$

・熱の保存式

$$\frac{D\Theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_j \theta} + \lambda_\theta \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}) \quad (3)$$

・水蒸気の保存式

$$\frac{DQ}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_j q} + \lambda_q \frac{\partial Q}{\partial x_j}) \quad (4)$$

上式において ρ : 空気の密度, u_i : 風速の第 i 方向成分, θ : 温位, q : 比湿, p : 圧力を表わしている。大文字はアンサンブル平均量を, 小文字は変動量を意味する。運動量, 熱, 水蒸気の分子粘性や分子拡散係数はそれぞれ ν , λ_θ , λ_q で与えられている。 g は重力加速度, Ω_j はコリオリ力である。 ϵ_{ijk} は交代テンソルである。

上記の基礎方程式中に表れる乱流量の 2 次モーメント $\overline{u_i u_j}$, $\overline{u_j \theta}$, $\overline{u_j q}$ に対しては, 乱流エネルギー k とその散逸率 ϵ とを乱流場を表現する代表量と考える $k-\epsilon$ モデルを適用した。すなわち, 乱流フラックスを以下のように表現する。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$-\overline{u_j \theta} = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}, \quad -\overline{u_j q} = \frac{\nu_t}{\sigma_q} \frac{\partial Q}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

k および ϵ の輸送方程式は次のようである。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} - \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + c_{\epsilon 1} \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + c_{\epsilon 3} \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

以上において, $\sigma_\theta, \sigma_q, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ は乱流プラントル数, $c_\mu, c_{\epsilon 1}, c_{\epsilon 2}, c_{\epsilon 3}$ はモデル定数である。ただし, Detering-Etling(1985), Dawsonら(1991)に従い, 定数 $c_\mu, c_{\epsilon 1}$ の値を標準値から 0.026, 4.4 に変更している。

都市の影響を受けて現れるヒートアイランド現象の構造を解明するためには計算メッシュスケールより小さい建築物や植生群の効果を適切にモデル化することが必要である。そこで, エクマン層に対するモデルの下部境界での値を与える接地層をいかに取り扱うかが重要になる。次に接地層のモデル化について記述する。

2.2 接地層のモデル化

接地層ではフラックスが高さによらず一定と仮定することができる。接地層における速度の鉛直分布と温位の鉛直分布は次式で記述される。

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_\tau}{\kappa z} \phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\theta_\tau}{\kappa z} \phi_h \left(\frac{z}{L} \right) \quad (11)$$

ここで, 摩擦速度 $u_\tau = (-\overline{uw})^{1/2}$, 摩擦温度 $\theta_\tau = -\overline{w\theta}/u_\tau$ である。また, ϕ_m, ϕ_h は大気安定度に依存する無次元シア関数であり, 例えばモーニン・オブーフ長さ L を用いて以下のように表される。

$$\phi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} (1 - 16 \frac{z}{L})^{-1/4}, & \text{for } \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + 6 \frac{z}{L}, & \text{for } 0 \leq \frac{z}{L} \leq 0.3, \\ (1 + 22.8 \frac{z}{L})^{1/2}, & \text{for } 0.3 \leq \frac{z}{L} \end{cases}, \quad \phi_h \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} (1 - 16 \frac{z}{L})^{-1/2}, & \text{for } \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + 6 \frac{z}{L}, & \text{for } 0 \leq \frac{z}{L} \leq 0.3 \\ (1 + 22.8 \frac{z}{L})^{1/2}, & \text{for } 0.3 \leq \frac{z}{L} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 地表面の熱収支

接地層内の解析を行うためには地表面温度を知る必要がある。地表面における熱収支は次のように定式化される。

$$S_g + AE = R_g + H + lE + G \quad (13)$$

ここで、 S_g は正味の日射量、 AE は人工熱量、 R_g は正味の長波放射、 H は顕熱量、 lE は蒸発に伴う潜熱量、 G は地中への熱伝導量である。地表面温度は上式と地中における熱伝導方程式を連立させて求めるが、ここでは Force Restore Method を用いて算出した。熱収支式中の各項について概略を以下に述べる。

(A) 短波放射：地球大気の上限に到達する日射量を S_{inf} 、太陽の天頂角を ζ 、地表面のアルベドを α_g 、大気層の透過率 τ_0 とすると、地表面に到達する正味の日射量 S_g は以下のように表される。

$$S_g = (1 - \alpha_g)\tau_0 S_{inf} \cos \zeta \quad (14)$$

(B) 長波放射：地表面温度を T_g としたとき、地表面における長波放射の正味のフラックス R_g は山本・プラントの式を用いて次のように近似的に表現される。ただし、式中の e_m は接地層の平均的な水蒸気圧である。

$$R_g = L^{\uparrow} - L^{\downarrow} = \sigma T_g^4 - (0.51 + 0.066\sqrt{e_m})\sigma\Theta^4 \quad (15)$$

(C) 顕熱および潜熱輸送：顕熱フラックス H 、潜熱フラックス lE は以下のように表される。

$$H = \rho C_p C_h U_a (T_g - T_a) \quad (16)$$

$$lE = \rho L C_e U_a (q_g - q_a) \quad (17)$$

ここで、 C_h 、 C_e はバルク係数、 U_a 、 T_a 、 q_a はそれぞれ大気の流れ、気温および比湿であり、 T_g 、 q_g は地表面での温度と比湿、 C_p は定圧比熱、 L は水の潜熱である。

地表面での比湿は地面の蒸発効率 β_g が一定と仮定して求める。

$$q_g = \begin{cases} \beta_g q_s(T_g) + (1 - \beta_g)q_a, & \text{for } q_s(T_g) \geq q_g \\ q_s(T_g), & \text{for } q_s(T_g) < q_g \end{cases} \quad (18)$$

ただし、 $q_s(T_g)$ は地表面温度 T_g における飽和比湿を表す。

(D) 地中への熱伝導：地中への熱輸送フラックス G は $k_g(\partial T/\partial z)|_{z=0}$ と表されるが、それは次の熱伝導方程式の解として求められる。

$$c_g \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_g \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (19)$$

上式中の c_g 、 k_g はそれぞれ土壌の熱容量、熱伝導率である。

2.4 キャノピー層のモデル化

以上では運動量、熱、水蒸気の交換が行われる地表面は厚さのない面としていた。しかし、草地や森林あるいは建物がそびえる都市などにおける各種物理量交換は有効な厚さを持つキャノピー層で行われる。そこで本研究においては、植物キャノピーと都市キャノピーを別途取扱うこととする。植物キャノピー層内部については、Deardorff(1978)に倣い、キャノピー層内を大気、植生、地表面に分けて相互の物理量のやりとりをモデル化した。また、都市キャノピーについては、Deardorffの vegetation canopy model を参考にして、都市を直方体のビルと道路が連続して並ぶストリートキャニオンとモデル化した高橋ら(1990)のモデルを用いる。このモデルではビルの占有率に加えて、ビルの壁面による放射の遮蔽効果やビル壁面の熱容量が考慮されている。

2.5 混在化した土地利用の取扱い

数値モデルにおいては、解析領域を数百 m あるいは数 km の格子に分けて、都市または郊外の地面での運動量、熱、水蒸気の輸送量を評価する。しかし、通例その格子の中にはさまざまな土地利用が混在している。実際の数値計算の際には、大気最下層の格子点での気温等が下側境界条件として必要になる。ここでは、Kimura(1989)に従い、各土地利用におけるフラックスを面積比率に応じて平均し大気層最下部の境界条件とする方法を採用した。

3. 計算方法および条件

3.1 離散化法とアルゴリズム

スタガード格子網上にて基礎方程式を有限体積法により離散化した。基本的なアルゴリズムは次のようである。接地層モデルにおいて地表面における温度や比湿の収束解を繰り返し計算により求める。次に収束した値を用いて運動量フラックス、顕熱フラックス、潜熱フラックス、 k 、 ϵ を求め、エクマン層モデルにその底部の境界条件として引き渡す。一方、エクマン層モデルの計算ではSIMPLEアルゴリズムにより乱流場の収束解を得る。計算結果は再度接地層モデルへ戻され、全ての変数の変化が十分に小さくなるまで繰り返し計算が行われる。その繰り返し計算をつかさどるループを抜けた時点で時間ステップが進み、設定終了時刻に達するまで計算が行われる。

3.2 解析対象および計算条件

解析対象は図-1に示すように、海と陸が接している2次元の標高差ゼロの地形上の輸送現象である。2次元の解析領域の範囲は長さ80km、高さ3kmの範囲とする。

初期条件としては典型的な夏型の気象条件を考え以下のように設定した。温位については水平方向に一様とし、鉛直方向に $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ で変化するものとした。海面温度と地表面温度には303Kを与えた。また、今回の計算では気圧傾度なしであり、一般風はなしとしている。

エクマン層の計算に際して設定した下部以外の境界条件は以下の通りである。

$$\text{側面: } \frac{\partial U}{\partial x} = W = \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

$$\text{上空: } U = W = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0, \quad \Theta, Q : \text{given.} \quad (21)$$

また、接地層モデル中の熱伝導方程式に対しては深さ0.5mにて 25.5°C で一定の境界条件を課した。

3.3 土地利用パターン

都市化が熱環境に与える影響を理解するために表-2に示すように3種類の土地利用パターンを設定し、2次元非定常計算を実施した。CASE1は全く開発されていない状態であり、陸地はすべて草地の場合である。CASE2では都市化が熱環境に与える影響を見るために、基本状態から開発が進められ、海岸線から50kmまで草地在り市街化された場合を考える。さらに臨海部が埋め立てられた場合をCASE3とする。ここでは陸地に接している海側の土地が4kmにわたって建物密度の高い業務地になったものとする。以下では主として午後3時における解析結果を示す。

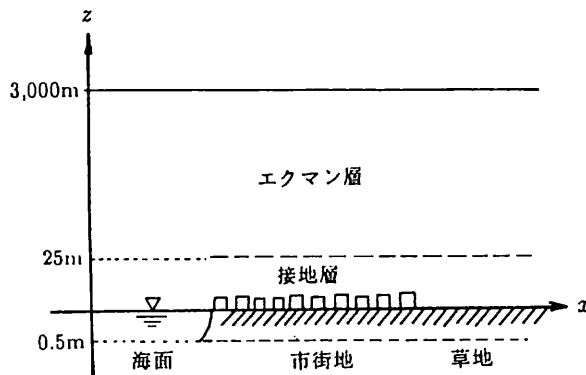


図-1 解析対象

3.4 土地利用区分の設定

土地利用により地表面性状は異なる。ここでは地表面性状によって接地層における取扱いを3通りに分けて行う。1つは裸地、水面、道路のように地表面と大気が直接フラックスの交換を行うもの、2つめは草地、水田、森林のように植物キャノピーの取扱いをするもの、そして3つめは都市キャノピーとして取り扱うものである。この分類に沿って土地利用ごとの地表面パラメータの値を文献の値を参照して表-1のように設定した。

表-1 土地利用パターン

| 距離 (km) | 0-18 | 18-22 | 22-62 | 62-80 |
|---------|------|-------|-------|-------|
| CASE1 | 海 | 海 | 草地 | 草地 |
| CASE2 | 海 | 海 | 市街地 | 草地 |
| CASE3 | 海 | 業務地 | 市街地 | 草地 |

表-2 土地利用ごとの地表面パラメータの設定

| | 海面 | 草地 | 市街地 | 業務地 |
|--------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| キャノピー層高さ | — | 0.3 | 7.5 | 10.0 |
| 粗度高さ | 1.0×10^{-4} | 0.025 | 1.88 | 2.5 |
| アルベド(地表面) | 0.1 | 0.12 | 0.1 | 0.1 |
| アルベド(キャノピー層) | — | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 熱伝導率 | 4.19×10^3 | 1.09 | 1.76 | 1.76 |
| 熱容量 | 4.19×10^6 | 2.18×10^6 | 2.18×10^6 | 2.18×10^6 |
| シールドングファクタ | — | 0.8 | 0.6 | 0.7 |
| ビューファクタ | — | — | 0.8 | 0.7 |

4. 計算結果および考察

まず、都市化が熱環境に与える影響を見るためにCASE1とCASE2の比較を行った。風速ベクトル、比湿および気温分布を図-2,3に示す。なお、鉛直方向の風速は10倍に拡大されている。CASE1においてもCASE2においても海風の侵入に伴ってその先端部分で上昇流が起こっている。しかし、CASE1とCASE2ではその発生場所が異なる。CASE2ではCASE1ほど海風が陸地へ侵入していない。気温を見るとCASE2の方が全体的に2度程度高くなっており、上昇流の発生箇所が増えるとともに、その上昇速度は最大で50 cm/sに達している。CASE1においても上昇流が確認できるが、その強度はCASE2の半分程度である。比湿は上昇流により鉛直方向に輸送されていることが確認できる。

地表面付近の熱輸送を比較するために、地表面温度と地上25mの気温及び接地層上端部の顕熱輸送量、潜熱輸送量を図-4,5に示す。市街地のほうが草地よりも顕熱量が多いため気温が高くなっていることがわかる。なお、40km付近でフラックスが小さいのは、ここで対流が下降しており上空に熱い空気が入り込んでいるためである。CASE2において海に接するグリッドで顕熱量が大きくなっているのは海からの冷たい空気が入り込んでいるからであろう。さらに、海に近いグリッド程涼しい傾向がみられる。

CASE3に対する風速、比湿および気温分布を図-6に示す。鉛直方向の速度成分がCASE2の場合より大きくなっている。臨海部の開発が粗度を大きくし、気温を上昇させるために周辺地域の大気の乱れを大きくしていると考えられる。気温分布図より気温の高い箇所が4箇所生じていることがわかる。また、図-7に示す地表面付近の熱の出入りをCASE2のものと比較すると、臨海部の開発により顕熱輸送が全般的に多くなっている。開発地域の気温が一番高く、内陸に進むにつれ気温が低くなる傾向が存在する。CASE1, CASE2では海の効果が内陸にまで及んでいた。開発地域に設定した業務地は地表面粗度が大きく人工熱も多い。そのため海の冷熱効果が内陸に及ぶのを妨げる働きをしている。

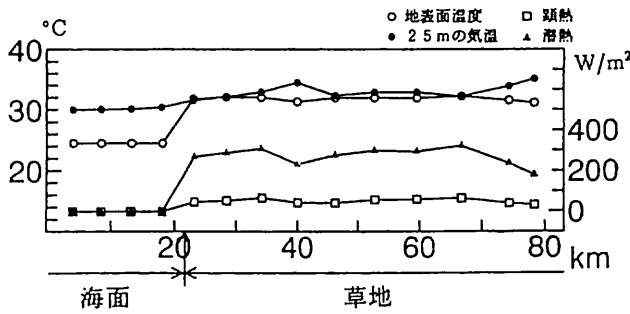


図-4 気温、熱フラックス分布 (CASE1)

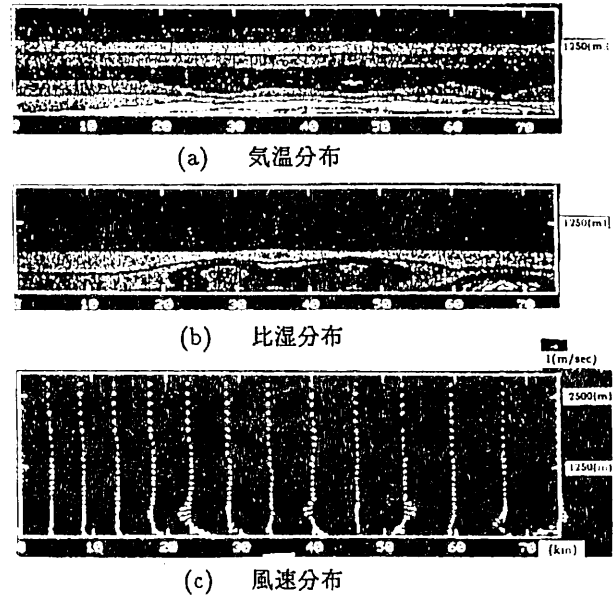


図-2 CASE1の計算結果

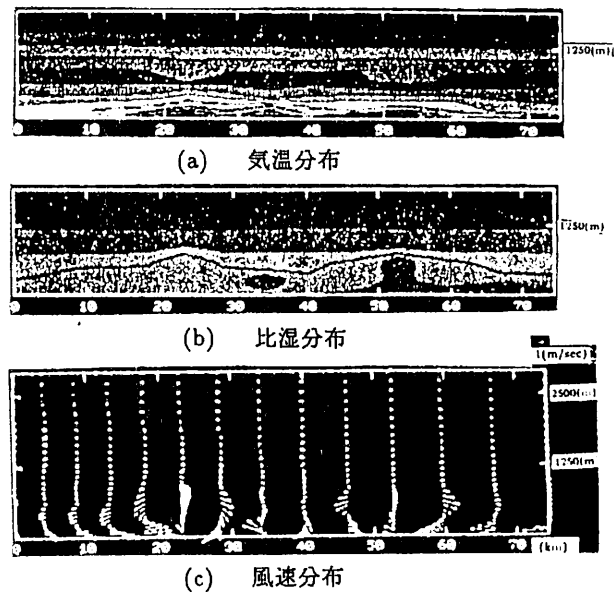


図-3 CASE2の計算結果

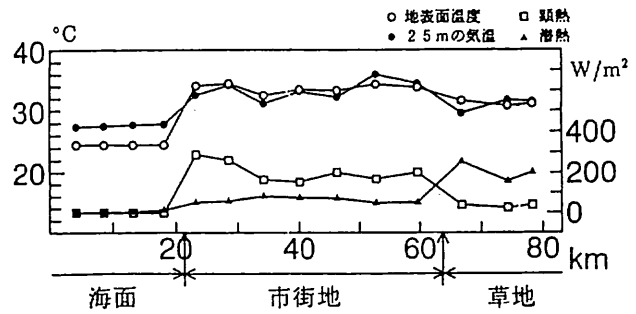


図-5 気温、熱フラックス分布 (CASE2)

図-8は市街地全域の平均気温の鉛直分布を比較したものである。図中には緑化策をとった場合の結果が含まれているが、臨海部の開発により500mまで気温が上昇していることが確認される。

5. 結論

都市域の熱環境を解析するためのモデルを構築し、数値シミュレーションを通して、臨海部の開発事業が海風を変化させ、既存の都市域の熱環境を悪化させる可能性があることを示した。今後は実際の土地利用データ、人工熱発生量データを入力して3次元解析を行うつもりである。なお、計算の安定化、高速化及び地形の起伏を考慮すること、境界条件の設定方法等の問題を克服することが必要である。

参考文献

- 1) Kondo, H.(1990): A numerical experiment of the "extended sea breeze" over the Kanto plain, J. Meteorol. Soc. Japan, 68, 419-434.
- 2) Detering, H. W. and Etling, D.(1985): Application of the E-ε turbulence model to the atmospheric boundary layer, Boundary-Layer Meteorol., 33, 113-133.
- 3) Dawson, P.J, Stock, D.E. and Lamb,B.(1991): The numerical simulation of air flow and dispersion in three-dimensional atmospheric zones, J. Appl. Meteorol., 30, 1005-1024.
- 4) 竹内清秀, 近藤純正 (1981): 地表に近い大気 (大気環境科学講座 1), 東京大学出版会.
- 5) Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in adiabatic conditions, Boundary-Layer Meteorol., 9, 91-112.
- 6) 川又孝太郎 (1994): "3次元熱環境解析モデルの構築", 東京大学修士論文.
- 7) Deardorff, J.W.(1978): Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, J.G.R., 83, 1889-1903.
- 8) Kimura, F. and Takahasi, S.(1991): The effect of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area, Atmos. Env., 25B, 155-164.
- 9) 高橋俊二, 木村富士男, 鈴木基雄 (1990): 都市気候を表現する数値モデルの開発, 日本気候学会講演予稿集, 57, 104.
- 10) Kimura, F.(1989): Heat flux on mixtures of different land-use surface: test of a new parameterization scheme, J. Meteorol. Soc. Japan, 67, 401-409.

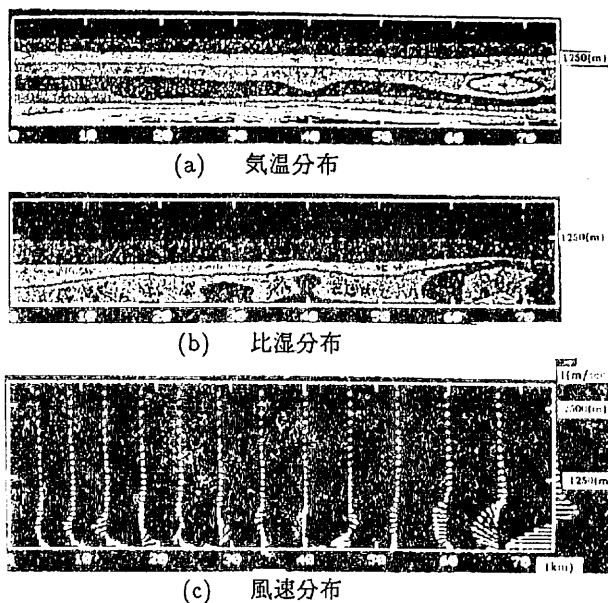


図-6 CASE3の計算結果

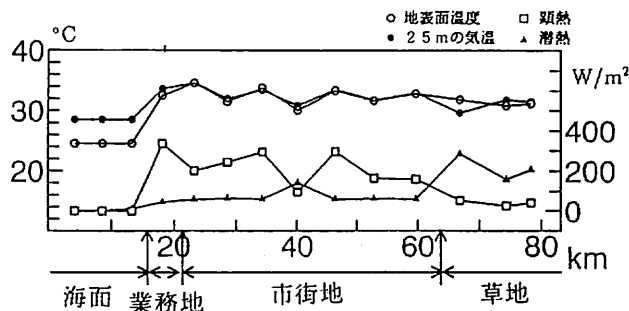


図-7 気温、熱フラックス分布 (CASE3)

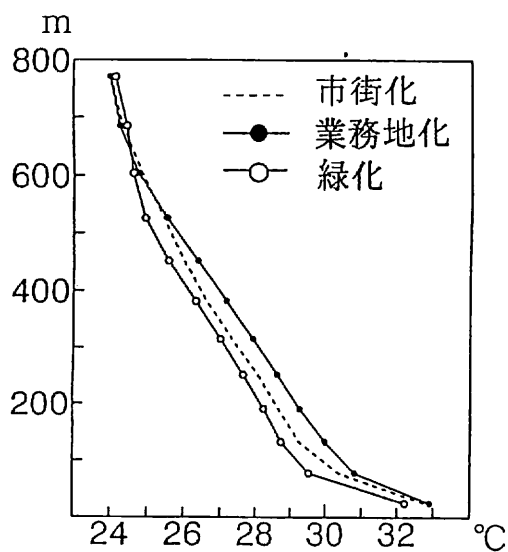


図-8 市街地の気温の鉛直分布