

LESを用いた都市熱環境の数値シミュレーション

九州大・総理工 学生員 ○有田清彦 正会員 松永信博
正会員 杉原裕司 学生員 福田和代

1.はじめに

近年、都市における人工廃熱の増大や被覆形態の変化に伴い、ヒートアイランド現象と呼ばれる都市の高温化が問題となっている。本研究では、都市スケールの大気熱環境を予測するために、ラージ・エディ・シミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) に基づいた3次元数値モデルを作成した。

2.数値モデルの概要

本モデルに用いた基礎方程式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= -C_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + f v + D_1 \\ \frac{Dv}{Dt} &= -C_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - f u + D_2 \\ \frac{Dw}{Dt} &= -C_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial z} + g \left(\frac{\theta}{\bar{\theta}} - 1 \right) + D_3 \\ C_p \left(\theta \frac{\partial^2 \pi}{\partial x_i^2} + \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \pi}{\partial y} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) \\ &= f \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \\ \frac{DE}{Dt} &= g \left(-\frac{1}{\bar{\theta}} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_m \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) - \frac{C_\epsilon}{L} E^{\frac{3}{2}} \\ \frac{D\theta}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \\ D_i &= \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}, \quad R_{ij} = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} E \\ K_m &= C_m L E^{\frac{1}{2}}, \quad Q_i = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + D_i + \delta_{i3} g \frac{\theta}{\bar{\theta}} \\ L &= (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}} \end{aligned}$$

ここでは、気圧 p と温度 T の代わりにそれぞれ

$$\Pi = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R_a/C_p}, \quad \theta = \frac{T}{\Pi}$$

で定義される無次元の気圧 Π と温度 θ を導入している。ただし、 u, v, w は x, y, z 方向の風速成分、 E はサブグリッド・スケールの乱流運動エネルギー、 π は Π の初期状態からのずれを表す。また C_p, f, g は、それぞれ乾燥空気の定圧熱容量、コリオリパラメータ、重力加速度である。 K_m, K_h は、それぞれ運動量拡散係数、熱拡散係数を示す。 C_ϵ, C_m はモデル定数、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ はそれぞれ x, y, z 方向の格子間隔である。本研究では、 $C_\epsilon = C_m = 0.2$ とし、 $K_h = 3.0 \times K_m$ の関係を用いた。計算格子にはスタッガード・メッシュを採用し、対流項には3次の風上差分、その他の空間微分には2次の中心差分を用いて、上の基礎方程式を離散化した。時間積分にはEulerの陽解法を用いてMAC法により計算を行った。境界条件は上・下面では風速は free-slip

条件、その他の物理量は一定値とし、側面では各物理量の1階微分を0とした。

3.計算結果および考察

簡単な条件下でのシミュレーションを行いモデルの妥当性を検討した。ここで、格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 1000\text{m}$, $\Delta z = 500\text{m}$, 時間刻み幅は $\Delta t = 1\text{s}$ である。大気の初期状態は無風で、図1に示すような温位分布を持つものとする。地表面の中央部に、図2のような温位擾乱を定常的に与えた。

図3~6は、計算開始から60分後における、ほぼ定常状態となった風速と温位 ($\theta - \bar{\theta}$) の分布を示す。計算開始と同時に温位擾乱が最大値をとる領域から上昇流が発生し、その後上昇流の発生する領域は幅約5 kmにまで広がる(図3参照)。このときの上昇流の大きさは7 m/s程度であり、計算を行った2時間の間での最大値であった。

地表面付近にある周囲より高温の空気塊は浮力により上昇するが、周囲と同じ温度になる高度までくると浮力が働かなくなる。しかし、空気塊はそれまでの浮力により与えられた慣性力のため、この高度を過ぎ周囲より低温になった高度で止まる。このためヒートアイランドの上空には、周囲に比べて低温な空気塊が存在する。これはクロスオーバー現象と呼ばれており、本モデルの計算結果においても、中心部の上空4 km付近に周囲より低温の空気塊が見られた。また、それより高度の低い領域にはドーム状の高温域が見られた。これはヒートアイランドの特徴の一つで、都市大気ドームと呼ばれるものである。(図4参照)。

図5に示すように、中心部に発生した上昇流により、地表面付近には中心に向かう流れが発生する。この流れがスパイラルしているのはコリオリ力の影響である。このケースにおける温位の水平分布は、スパイラルする流れに伴い組織的な構造を有することがわかる(図6参照)。

4.おわりに

今回の計算では、計算領域の中央部の地表面に温位擾乱を与えてその高温部分を都市とみなした。その結果、ヒートアイランドの特徴であるクロスオーバー現象および都市大気ドームを確認することができた。しかし、側面の境界条件の影響が大きい点や、地表面付近の差分間隔の粗さが問題点として挙げられる。

実際の都市に本モデルを適用させるためにはこれら

の点の改善が必要だと思われ、現在より精度の良いモデルに改良中である。また今後は、比湿を変数として加え地表面の熱収支を含めたモデルの構築を行う予定である。

謝辞:本研究の図の作成には地球流体電腦ライブラリーを用いた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日野幹雄：日本流体力学会編，地球環境と流体力学，朝倉書店，pp.209-220,1992

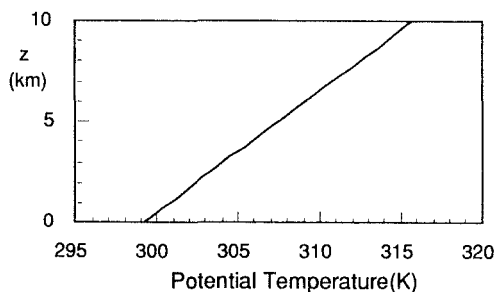


図 1: 初期状態における温位の鉛直分布

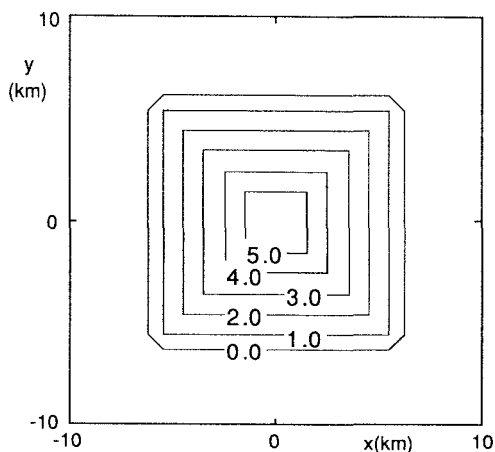


図 2: 地表面温位分布

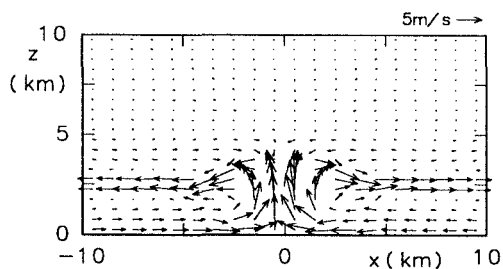


図 3: $y=0$ における風速分布 (60 分後)

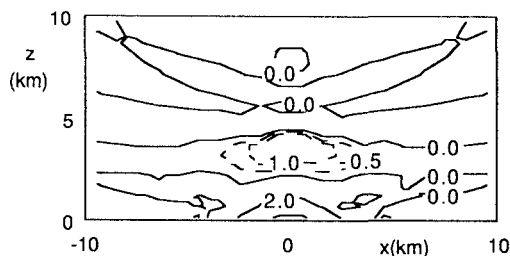


図 4: $y=0$ における温位 ($\theta - \bar{\theta}$) 分布 (60 分後)

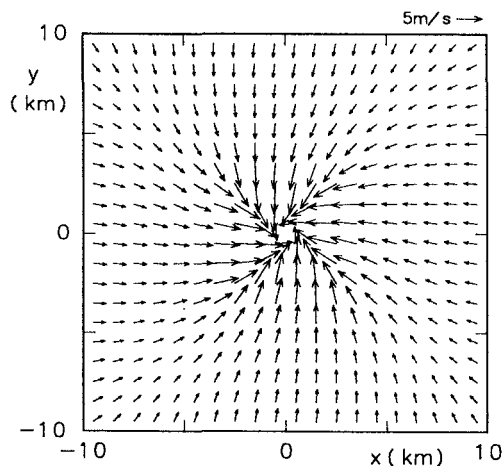


図 5: $z=250\text{m}$ における風速分布 (60 分後)

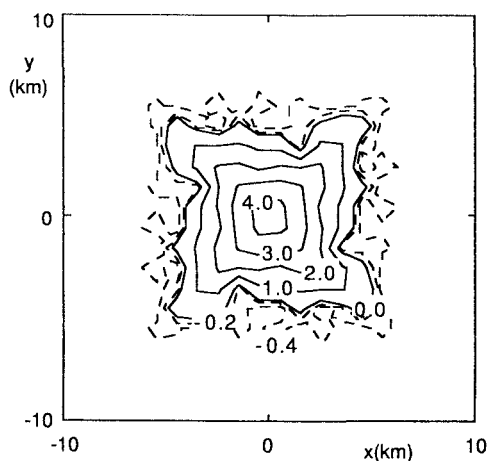


図 6: $z=250\text{m}$ における温位 ($\theta - \bar{\theta}$) 分布 (60 分後)