

都市キャノピースケールにおける地表面温熱環境解析

中央大学大学院 学生員 ○堀池 慎治
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

近年、都市部において地表面のコンクリート化やそれに伴う植生の減少といった土地被覆の改変が進んだことにより、ヒートアイランド現象が顕在化してきている。その緩和策として、屋上緑化や都市内河川周辺環境の有効利用などが考えられるが、緩和効果を効率良く得るためには、対象とする都市の熱特性を把握し、地域特性に応じた適切な評価を行うことが重要である。

著者らの既往の研究¹⁾では、安定化有限要素法による都市の温熱環境解析手法の構築が行われたが、気温分布へ与える影響について十分な検討がなされていなかった。そこで、本研究では、地表面性状が温熱環境に与える影響の評価に加え、低温領域の気候緩和効果の評価を行うため、非等温場における LES を用いた数値解析により、低温領域の配置の違いが気温の分布に及ぼす影響について検討を行った。支配方程式には Boussinesq 近似を用いた Navier-stokes 方程式を用い温度場の影響を考慮した解析を行う。空間方向の離散化には複雑な形状に適用可能な有限要素法²⁾を適用し、時間方向の離散化には Crank-Nicolson 法を用いる。また、都市内低温領域の効果を検証する解析例として、河川を有する都市域実地形モデルを用い水面熱収支計算を行った。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

流体は非圧縮性粘性流体を考え、Boussinesq 近似を仮定する。そのときフィルタリングを施した、Grid Scale (GS) の運動方程式、連続式、エネルギー方程式、絶対湿度の輸送方程式はそれぞれ式 (1)、(2)、(3)、(4) で表される。運動方程式；

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g\beta (\bar{\theta} - \theta_0) \delta_{i3} = 0 \quad (1)$$

$$\text{連続式；} \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

エネルギー方程式；

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial h_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

絶対湿度の輸送方程式；

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial f_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

$$h_j = \bar{u}_j \bar{\theta} - \bar{u}_j \bar{\theta} \quad (6)$$

$$f_j = \bar{u}_j \bar{q} - \bar{u}_j \bar{q} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{u}_i$, $\bar{p}$, $\bar{\theta}$, $\bar{q}$ はそれぞれフィルタリングを施した流速、圧力、温度、絶対湿度である。また、 τ_{ij} は SubGrid Scale (SGS) 応力、 h_j は SGS 熱流束、 f_j は SGS 湿度流束を表す。SGS 応力 τ_{ij} に対するモデル化には LES (Smagorinsky モデル)³⁾を用いる。また、Smagorinsky モデルでは壁面での SGS 応力が 0 とならないため、van Driest の壁面減衰関数 f_s ⁴⁾を用いて補正を行う。

(2) 離散化手法

基礎方程式、式 (1)、(2) に対して SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法を、式 (3)、(4) に対して SUPG 法に基づく安定化有限要素法を用いて空間方向の離散化を行う。時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法により離散化を行い、連立 1 次方程式の解法には Element-by-Element Bi-CGSTAB2 法を用いた。

3. 地表面の熱収支

太陽から地表面に与えられた熱エネルギーは顕熱や潜熱に変換されるが、地表面の種類や状態によってその配分比が変わる。熱収支式において、日射量や温度を入力条件として地表面におけるつり合い式を解き、Newton 法により地表面温度を求める。その概念図を図 - 1 に示し、熱収支式を式 (8) に示す。

$$(1 - \text{ref}) S_i + R_i = \sigma T_s^4 + H + \iota E + C_i \quad (8)$$

ここで、 S_i は短波放射量、 R_i は長波放射量、 H は顕熱輸送量、 ιE は潜熱輸送量、 C_i は貯熱量、 ref はアルベド、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)、 T_s は地表面温度である。また、短波放射量、長波放射量に含まれる建物や地表面からの反射を考慮するために、モンテカルロ法から算出した形態係数を組み込んだ。

水面における熱収支計算は成田らの解析で求められた値を参考としている⁵⁾。

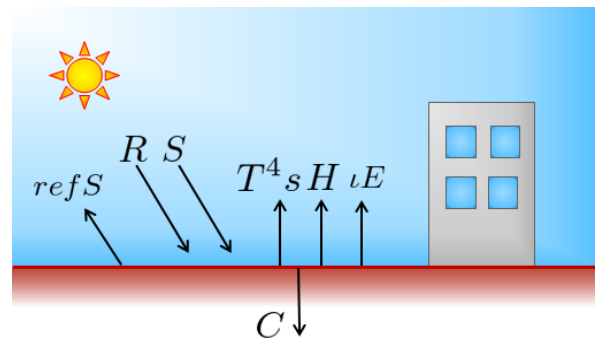


図 - 1 モデル概念図

KeyWords： ヒートアイランド現象，安定化有限要素法，LES (Smagorinsky モデル)

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-3421 FAX 03-3817-1815

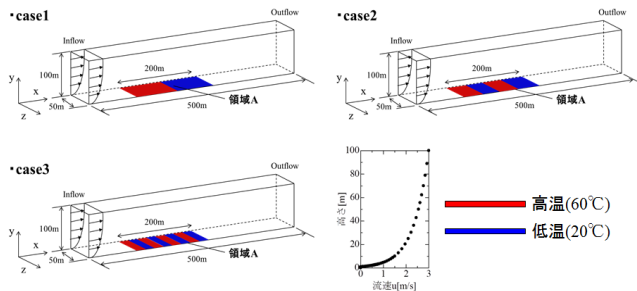


図-2 解析領域，流速分布

4. 数値解析例

(1) 解析条件

地表面の温度分布が温熱環境に与える影響の評価を行うため，解析領域 図-2 に示すように，地表面温度分布の異なる3つの case を用いて非等温場流れ解析を行い，他の解析結果との比較を行った．図-2 に示す領域に対し，領域 A 以外の地表面には温度境界条件に 40℃ を与えた．地表面温度の値は後藤らによる解析⁶⁾を参考にしており，上端面，側面は slip 条件，底面は non-slip 条件，流出境界には中山らによって提案された F.O.B.C.+S.R.C 流出境界条件⁷⁾，流入境界には 図-2 に示すように対数則を用い流速を与えた．解析には最小メッシュ幅 0.02m，節点数 107679，要素数 570000 の解析メッシュを用い，微小時間増分量は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2} \text{sec}$ とした．なお，本解析例では熱収支式を解かず，地表面温度は固定値としている．

(2) 解析結果

地表面付近において熱が伝達し，低温領域で空気が冷やされ，高温領域で空気が温められている様子が確認された．また，高温領域で温められた空気が流入流速の影響によって，風下側の低温領域に流れ込んでいる様子が確認でき，これはたとえ低温領域であっても，風上側に高温な地表面温度分布をもつ領域がある場合，高温な空気の流入によって気温冷却効果が得にくいことを意味している．図-3 に高さ 0.3m での各 case 温度分布（時間平均）における後藤らの解析結果との比較を示す．温度分布のピークの位置などに一致が見られ，定性的に良い一致が示された．しかし，後藤らの解析結果にあらわれる温度分布の境界上での edge 効果による熱伝達の増大がなく，温度分布に差異が見られた．

(3) 水面熱収支計算の適用

地表面性状別に異なるパラメータを用い，熱収支式を解くことで地表面温度を求め，実地形モデルへの適用を行った．既往の研究¹⁾により都市地形モデルとして日本橋周辺モデルへの適用が行われたが，本報告では新たにモデル内

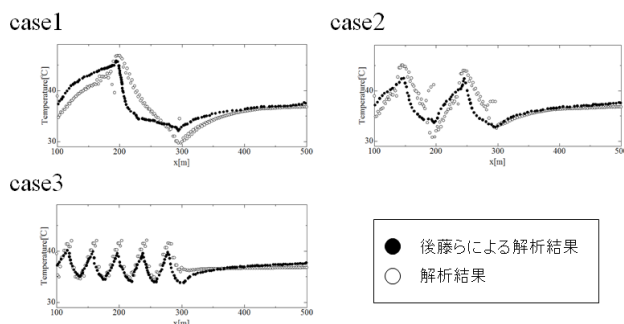


図-3 高さ 0.3m における温度分布（時間平均）

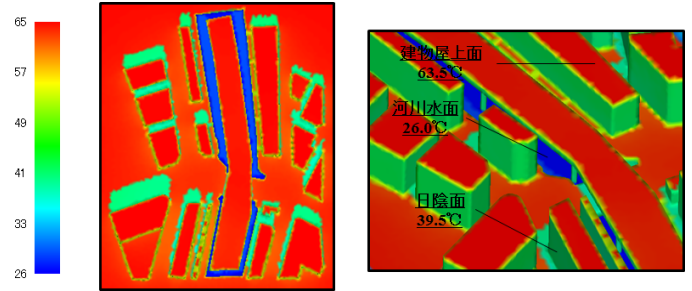


図-4 温度分布図

河川に水面熱収支計算を行い，モデルへの適用を行った．空気中の温度は 33.6℃，太陽方位等の大気側の条件は近藤らによる解析⁸⁾と同様の条件を用いた．上端面，底面，壁面は slip 条件とし解析を行った．

図-4 に水面熱収支計算を適用した地表面の温度分布図を示す．また，図中の数値は各地表面での温度を示す．建物により日射が遮られることで日陰が出来ていることが確認でき，日陰面では地表面温度の低下が確認できる．水面熱収支計算により，26.0℃と水面として比較的妥当な結果を得ることができた．

5. おわりに

本報告では，都市キャノピースケールにおける地表面温熱環境について数値解析を行うことで以下の結論を得た．

- 気温の主流方向水平分布において，既往の解析結果との比較した結果により，定性的に良い一致が示された．しかし，解析全体として，edge 効果による冷却・加熱効果の増大がみられず温度分布に差異が生じた．
- 水面熱収支計算により水面温度分布に妥当な値を示すことができた．

今後の課題として，温度境界上での edge 効果の再検証，建物がある領域での定量的な精度検証などが挙げられる．

参考文献

- 1) 池田哲也，櫻山和男：安定化有限要素法による都市の温熱環境解析手法の構築，応用力学論文集，Vol.15，68，pp.107-114，2013．
- 2) T.E.Tezduyar:Stablized finite element formulations for incompressible flow computations，*Advance in Applied Mechanics*，28，pp.1-44，1992．
- 3) J.Smagorinsky: General Circulation experiments with the primitive equations I. the basic experiment，*Monthly Weather Review*，91，pp.99-164，1963．
- 4) H.Werner and H.Wengle:Large-eddy simulation of turbulent flow over and around acube in a plate channel，*8th Symp. On Turbulent Shear Flows*，pp.155-168，1993．
- 5) 成田健一，植村明子，三坂育正：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究，日本建築学会計画系論文集，第 545 号，pp.71-78，2001-7．
- 6) 後藤庸幸，富永禎秀，持田灯，村上周三：緑地等の都市内部の低温領域の配置形態が気温に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1105-1106，2000．
- 7) 中山司，岩崎潤：熱移動を伴う管内粘性流の有限要素法解析における流出境界条件に関する検討，日本機械学会論文集（B 編），58 巻 554 号，pp.43-48，1992．
- 8) 近藤靖史，小笠原岳，大木泰祐，有働邦彦：建物屋根面の日射反射性能向上によるヒートアイランド緩和効果，日本建築学会計画系論文集，第 73 巻，第 629 号，pp.923-929，2008．