

安定化有限要素法による地表面近傍温熱環境解析

中央大学大学院 学生員 堀池 慎治
中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

近年、都市部では地盤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により、蒸発散量の減少や反射率の変化が起こり、それが主な原因としてヒートアイランド現象が顕在化してきていると考えられている。ヒートアイランド現象の緩和策として、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、その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、対策技術の相対的な評価、地域特性に応じた評価を行うことが重要である。

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、気温分布への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を評価するため、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う。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。

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、エネルギー方程式はそれぞれ式 (1)、(2)、(3) で表される。

運動方程式；

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

連続式；

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

エネルギー方程式；

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

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

$$h_j = \overline{u_j \theta} - \bar{u}_j \bar{\theta} \quad (5)$$

ここで、 \bar{u}_i 、 \bar{p} 、 $\bar{\theta}$ はそれぞれフィルタリングを施した流速、圧力、温度である。また、 τ_{ij} は SubGrid Scale (SGS)

応力、 h_j は SGS 熱流束を表す。格子で捉えきれない SGS の乱れによる GS の流れ場への影響は、 τ_{ij} を通じて GS の運動方程式に組み込まれる。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⁴⁾ f_s を用いて補正を行う。

(2) 流出境界条件処理法

流れを解析する場合、流出境界は計算領域から十分に離れた位置に設けられ、解析領域に対し境界による影響が現れないようにすることが一般的であるが、それは計算領域が増大し、計算規模の拡大につながる原因になってしまう。また、熱移動を伴う流れでは、断熱条件となり出口付近で熱がたまり不自然な流れをうむことになる。そこで、自然な流出を表現する境界条件処理を行うことが望まれる。

本報告では流出境界条件として、中山らによって提案された流出境界条件処理法⁵⁾を用いる。中山らの手法とは、境界積分項を未知量として扱う Free Outflow Boundary Condition に Sommerfeld 放射条件を組み込んだ境界条件 (以下 F.O.B.C.+S.R.C) を適用するものである。具体的には、式 (1)、(2)、(3) に対して安定化有限要素法による定式化を行う際に導出される弱形式の境界積分項において、流出境界 Γ_{out} の外向き法線方向に対し、S.R.C によって得られる以下の式を代入する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_1} = -\frac{1}{U_c} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (6)$$

ここで、 U_c は伝播速度であり、値の決定法はいくつか存在するが本解析では流入境界上の流速分布の平均値を用いた。

(3) 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) 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. 数値解析例

(1) 解析条件

地表面の温度分布の違いにより、温熱環境に与える影響の評価を行うため、解析領域 図 - 1 に示すように、一部の地表面を領域 A とし、図 - 2 に示す温度分布を各 case に与え、非等温場流れ解析を行った。図 - 1 に示す領域に対し、領域 A 以外のその他の地表面には 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、高

KeyWords： 安定化有限要素法, LES, 流出境界条件処理法

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1808 E-mail horiike@civil.chuo-u.ac.jp

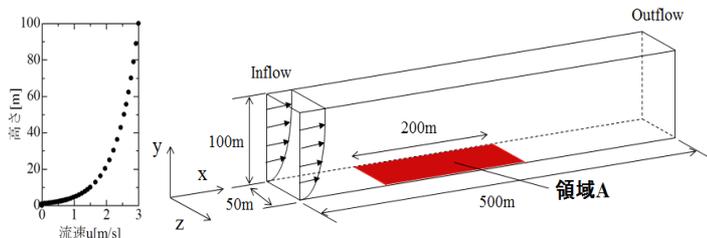


図-1 解析領域

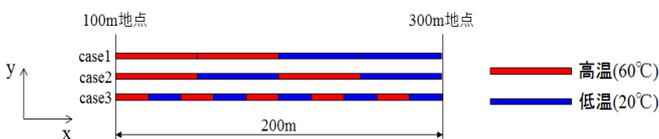


図-2 領域 A における各 case の地表面温度分布

高温領域は都市域，低温領域は公園や河川，その他の地表面は郊外域を想定している．上端面，側面は slip 条件，底面は non - slip 条件，流出境界には F.O.B.C.+S.R.C 流出境界条件，流入境界には 図 - 1 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，微小時間増分量は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2} \text{sec}$ とした．

(2) 解析結果

図 - 3 に case1 における空間温度分布図を示す．温度分布図から地表面付近において熱の伝達が確認でき，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できる．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る．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 - 4 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，case3 では比較的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．

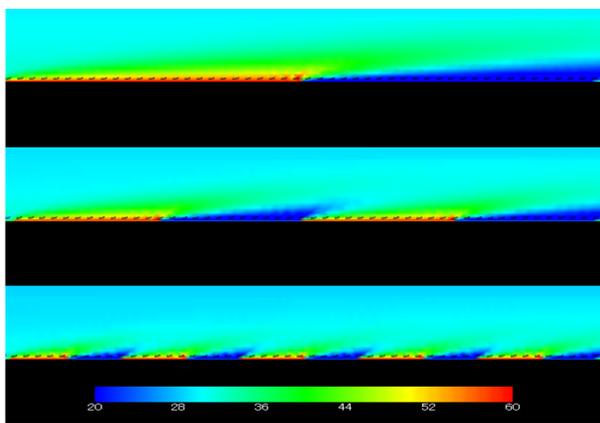


図-3 空間温度分布図 (上から case1,case2,case3)

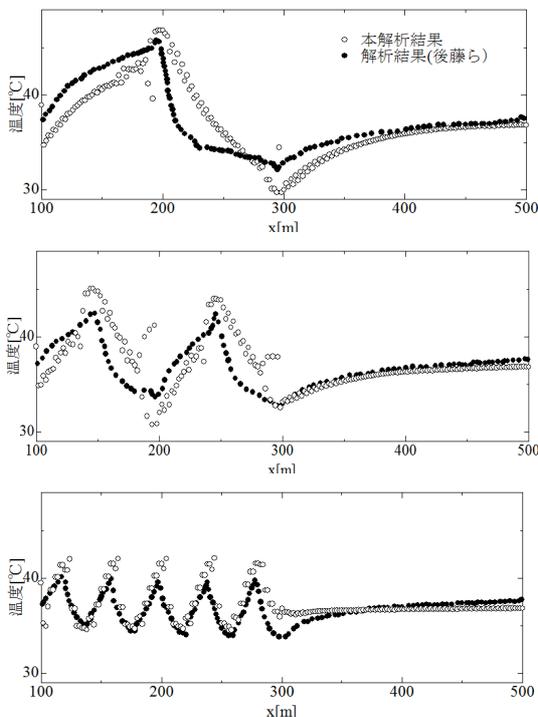


図-4 高さ 0.3m における温度分布 (時間平均)(上から case1,case2,case3)

4. おわりに

本報告では，都市の温熱環境において，地表面温度分布の違いが気温分布に及ぼす影響について検討を行うことで以下の結論を得た．

- 地表面温度分布の配置の違いは流入によって風下側領域の気温へ異なる影響を示すことがわかった．
- 気温の主流方向水平分布において，他の解析結果との比較により，case3 では比較的良い一致が示された．しかし，解析全体として，温度分布境界上での edge 効果がみられず温度分布に差異が生じた．

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気温分布解析などが挙げられる．

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) 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．
- 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.