

熱収支に基づく地表面組成の違いによる温熱環境への影響の検討

中央大学大学院 学生員 ○ 田中 洋志
中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

近年、産業の発展、構造物の集中・高層化、人口の増加が進み、これらが都市域に集中することでヒートアイランド現象が発生しており、社会問題の一つとなっている。ヒートアイランド現象によって生じる問題としては気温の上昇による熱帯夜の増加、局所的・突発的に発生する豪雨の増加、上昇気流・循環流の発生による大気汚染の蓄積がある。これらの改善を施すための計画及び実施には地域ごとでの熱特性の把握、地域特性に応じた評価を行うことが重要である。

著者らの研究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、地表面における土やコンクリートなどの組成の違いや植生量の大小による影響については検討がされていなかった。

そこで、本報告では温熱環境解析として、支配方程式に Boussinesq 近似を用いた Navier-Stokes 方程式を、地表面温度の算出には熱収支式を用い、地表面組成及び植生面積の違いによる地表面温度への影響の検討を行った。空間方向の離散化には任意形状に適合可能な有限要素法²⁾を適用し、時間方向の離散化には Crank-Nicolson 法を用いた。

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式

流体は非圧縮性粘性流体として扱い、Boussinesq 近似を仮定する。このとき、運動方程式、連続式、エネルギー方程式、絶対湿度の移流方程式はそれぞれ式 (1)、(2)、(3)、(4) で表される。

運動方程式：

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

連続式：

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

エネルギー方程式：

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

絶対湿度の移流方程式：

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

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (5)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (6)$$

$$\Delta = V_e^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$h_j = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (9)$$

$$q_j = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

ここで $\bar{u}_i$, $\bar{p}$, $\bar{\theta}$, $\bar{q}$ はそれぞれ LES(Smagorinsky モデル)³⁾に基づくフィルタリングを施した i 軸方向の流速、圧力、温度、絶対湿度である。 δ_{i3} は重力方向の単位ベクトル、 τ_{ij} は SGS 応力、 ν_{SGS} は SGS 渦粘性係数、 f_s は van Driest の壁面減数関数、 C_s は Smagorinsky 定数、 $\bar{S}_{ij}$ は Gridscale の変形速度テンソル、 h_j は SGS 熱流速、 q_j は SGS 湿度流速である。

(2) 離散化手法

式 (1)、(2) に対して SUPG/PSPG 法に、式 (3)、(4) に対しては 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った。時間方向の離散化には Crank-Nicolson 法を用いた。連立 1 次方程式の解法には element-by-element 処理を施した Bi-CG 法を用いた。

3. 地表面の熱収支

熱収支の概念図を図-1に、熱収支式を式 (11) に示す。熱収支において日射量や温度を既知量として与え、地表面での収支式を Newton 法により解くことで地表面温度を求めた。熱収支の計算により求められた地表面、構造物表面の温度は温熱環境解析において境界条件として用いた。

$$(1 - ref) S_i + L_i = \sigma T_s^4 + H + \iota E + G \quad (11)$$

S_i は短波放射量、 L_i は長波放射量、 T_s は地表面温度、 H は顕熱輸送量、 ιE は潜熱輸送量、 G は貯熱量、 ref はアルベド、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$) である。短波放射量、長波放射量の算出には地表面、構造

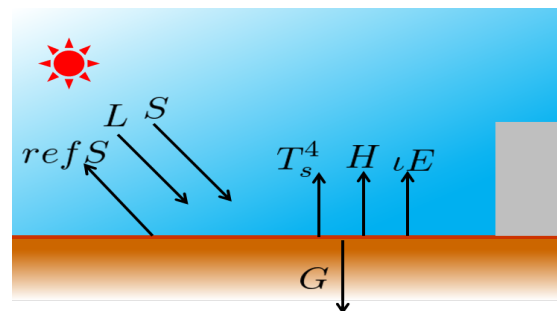


図-1 熱収支の概念図

KeyWords： 有限要素法，熱収支，蒸発効率，LES

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815 E-mail p.tanaka@civil.chuo-u.ac.jp

物表面からの反射を考慮するためにモンテカルロ法による形態係数を用いた．顕熱輸送量，潜熱輸送量の算出にはバルク式を用い，式はそれぞれ式(12)，(13)と表される．

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (12)$$

$$\iota E = \iota \rho \beta C_H U (q_s - q) \quad (13)$$

c_p は定圧比熱， ρ は空気の密度， $C_H U$ は交換速度， ι は蒸発潜熱， T は空間の温度， q は空間の比湿， q_s は地表面の比湿， β は蒸発効率である．交換速度は地表面組成によって与える値が異なり，本報告では地表面は草丈 1m の草地，構造物表面は裸地として取り扱い，それぞれ式(14)，(15)と表される．

$$C_H U = 0.002 + 0.0045 U_{1.5m} \quad (14)$$

$$C_H U = 0.0027 + 0.0031 U_{1m} \quad (15)$$

4. 数値解析例

(1) 解析条件

地表面の蒸発効率の違いにおける地表面温度への影響の評価を行うための解析例として 1 辺 30m の立方体からなる構造物が複数存在する街区モデルを対象とし，解析領域は図-2 に示す．初期条件としては流速，圧力に関しては全領域で 0 とし，温度は 31.6℃，湿度は 58.8% を与えた．境界条件としては底面は non-slip 条件，側面・上面は slip 条件，流入風速は $u(y) = (y(n) + 6.4)^{\frac{1}{4}}$ とした．Smagorinsky 定数は 0.12，太陽方位は 263.2°，太陽高度は 45.2°，微小時間増分量は 1.0×10^{-3} とした．

(2) 解析結果

蒸発効率 β が 0.03，0.3 の場合の地表面温度分布の結果を図-3 に示す．各蒸発効率での結果から構造物表面より地表面の温度の低くなっているため，地表面組成の違いによる温度変化が確認できる．また，蒸発効率の増大に伴い地表面の温度が約 10℃ 低下していることも確認できる．そのため，蒸発効率の増加，すなわち地表面の植生量の増大は地表面の温度を低下させる効果があることが確認できる．

続いて，本報告の各蒸発効率での地表面温度の妥当性の検証として吉田らの解析⁴⁾との比較を行い，その結果を図-4，図-5 に示す．蒸発効率が 0.03 における地表面温度の差は約 2℃ であるのに対し，蒸発効率が 0.3 における地表面温度の差は約 5℃ となった．この要因は蒸発効率の増大による潜熱輸送量の過大評価であると考えられる．

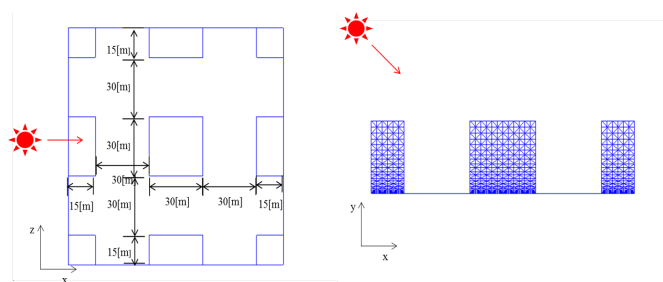


図-2 解析領域

5. おわりに

本報告では街区空間における地表面温度の解析を行い，以下の結論を得た．

- 蒸発効率の増大に伴い潜熱輸送量が増大し，地表面温度の低下することが確認できた．
- 蒸発効率が 0.03 における参照解と本解析での地表面温度の差は約 2℃ ほどであったが，蒸発効率が 0.3 においては約 5℃ となった．

今後の課題として，熱収支による地表面温度の改善を行うとともに蒸発効率の差による空間への温度・湿度の影響の検討，植生キャノピー表面からの蒸散による湿度の影響の考慮が挙げられる．

参考文献

- 1) 池田 哲也，檜山 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，土木学会論文集 A2(応用力学),Vol.69,No.2,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) 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.
- 4) 吉田 伸治ら:対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析，日本建築学会計画系論文集,No.529,pp.77-84,2000.

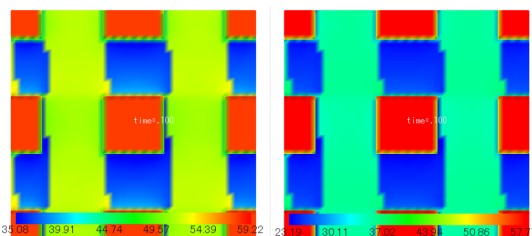


図-3 蒸発効率の違いによる地表面温度分布 (左: $\beta=0.03$, 右: $\beta=0.3$)

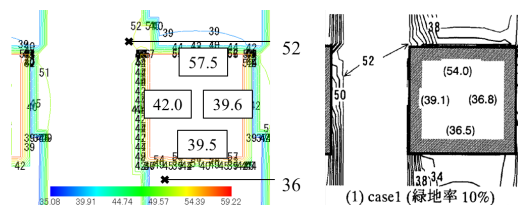


図-4 蒸発効率が 0.03 における参照解との比較結果

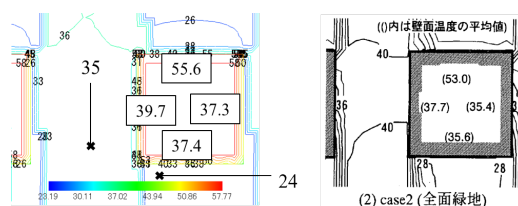


図-5 蒸発効率が 0.3 における参照解との比較結果