

蒸発効率による空間場の風速及び温度に与える影響の検討

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等がある。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、湿度そのものの影響や地表面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、本報告では支配方程式に湿度に関する移流方程式を加えるとともに、地表面組成の違いによる温熱環境への影響の検討を行った。なお、流れ場には Boussinesq 近似を用いた Navier-Stokes 方程式を用いた。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) 基礎方程式

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、フィルタリングを施した運動方程式、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；

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

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；

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

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

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

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

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

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

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

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、 f_j は SGS 湿度流束を表す。 δ_{i3} は重力方向の単位ベクトル、 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である。SGS 応力 τ_{ij} 、SGS 熱流束 h_j 、SGS 湿度流束 f_j に対するモデル化には LES を用いる。

(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²⁾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、有限差分法である二次精度の 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 処理を施した Bi-CG 法を用いた。

3. 地表面の熱収支

熱収支のモデル概念図を図 - 1 に、熱収支式を式 (11) に示す。日射量や温度を入力条件として地表面における熱収支を解き、地表面温度を求める。

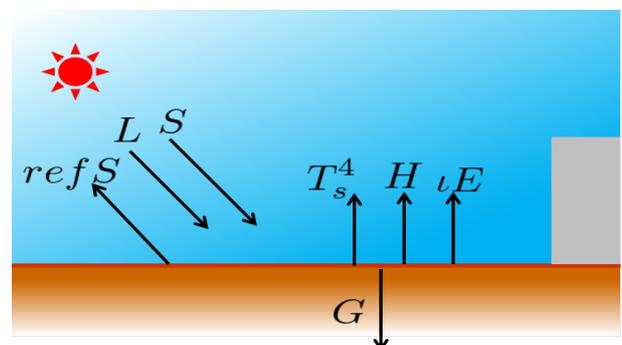


図 - 1 熱収支概念図

KeyWords： 安定化有限要素法，湿度の移流方程式，熱収支

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

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

ここで、 S_i は短波放射量、 L_i は長波放射量、 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。顕熱輸送量、潜熱輸送量の算出にはバルク輸送式を用い、式はそれぞれ。

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

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

ここで、 $c_p \rho$ は空気の体積熱容量 (1 気圧, 20 で $1.21 \times 10^3 \text{J/K} \cdot \text{m}^3$)、 ι は水の気化の潜熱 ($= 0$ で $2.5 \times 10^6 \text{J/kg}$)、 β は地表面の蒸発効率、 q_s は地表面温度 T_s に対する飽和比湿 [kg/kg]、 q は代表的な高度におけるの比湿である。交換速度は地表面性状によって値が異なり、裸地においては式 (14)、草丈 1m の草地では式 (15) と表される。本報告では地表面を草丈 1m の草地、構造物表面を裸地として取り扱うこととする。

$$C_H U = 0.0027 + 0.0031 U_{1m} \quad (14)$$

$$C_H U = 0.002 + 0.0045 U_{1.5m} \quad (15)$$

ここで、 U は代表的な高度における風速であり U の添字は地表面からの高さを表している。蒸発効率 β は水が存在しない場合では 0 とし、低草木が存在する場合においては全地表面のうち植生が存在する面積の割合である緑地率を用いて蒸発効率を算定する。

4. 数値解析例

地表面の蒸発効率 β の違いにおける温熱環境への影響の評価を行うための解析例として図 - 2 に示す 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する。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。

図 - 3、図 - 4 に蒸発効率 β が 0.03、0.3 の場合における z 軸中心断面、 $y=1.5\text{m}$ での時間平均の風速分布及び温度分布を示す。風速分布においては、風上側の壁近傍において概ね一致をしているが、風下の壁近傍において差異が見られる。また、風速が最大となる位置が風上側であり、大きさも小さいことが確認できる。一方、温度分布においては、蒸発効率 β に寄らず壁近傍において数値振動が発生しており、大きな差異が見られる。風下側の壁面で数値振動が大きいことからこの振動が風速に影響を及ぼしていると考えられる。

5. おわりに

本報告では街区空間における温熱環境解析を行い、参照解との比較を行った結果、以下の結論を得た。

- 参照解と本解析での高さ 1.5m での風速については流入面側の壁面における風速はおおよそ一致したが、流出面側の壁面において差異が見られた。
- 温度については壁面近傍において数値振動が発生しており大きな差異が見られた。

今後の課題として、空間場における温度の改善、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, 榎山 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) 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.

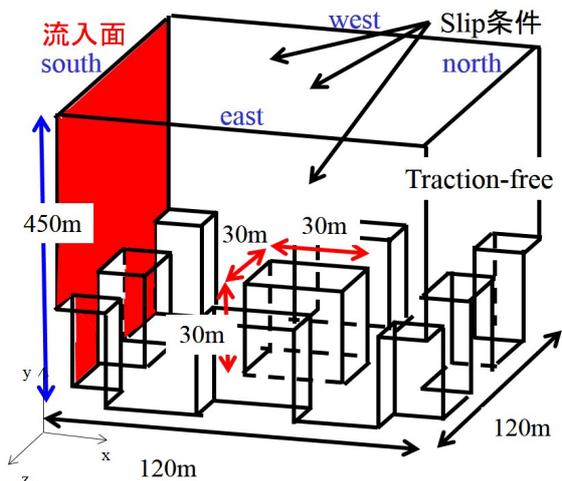


図 - 2 解析領域

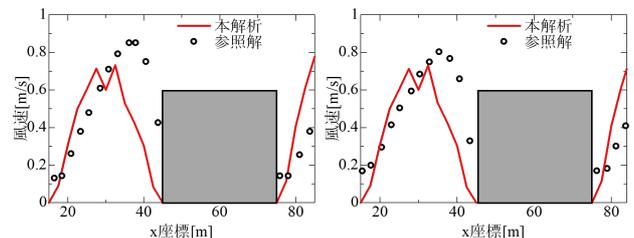


図 - 3 $y=1.5\text{m}$, $z=60.0\text{m}$ での風速分布 (左: 蒸発効率 $\beta=0.03$, 右: 蒸発効率 $\beta=0.3$)

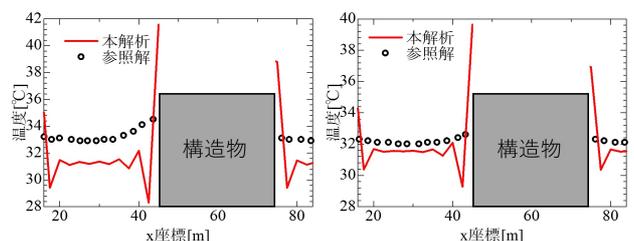


図 - 4 $y=1.5\text{m}$, $z=60.0\text{m}$ での温度分布 (左: 蒸発効率 $\beta=0.03$, 右: 蒸発効率 $\beta=0.3$)