

広島市街区における風・熱環境モデルの開発とヒートアイランド策に関する数値実験

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○栗原健治
(当時) 広島大学大学院工学研究科 非会員 片田裕昭
広島大学大学院工学研究科 正会員 陸田秀実
広島大学大学院工学研究科 正会員 土井康明

1. 緒論

近年、地球規模の温暖化に加えて、日本の都市部ではヒートアイランド現象の進行が年々顕在化の一途を辿っており、その有効的な技術的対応策が緊急の課題となっている。現在、クールアイランド策として、都市緑化や打ち水（散水）対策が行われているが、これらの気温低減効果は広く認識されているものの、どの程度のクールアイランド効果が期待できるのか不明な部分が多く、その定量的な検証には至っていない。

既往の数値シミュレーションによる都市高温化予測やクールアイランド策による気温低減効果の検証では、メソスケール気象モデル（例えば、MM5 など）を用いてグローバルスケールの土地被覆変化やそれに伴う温熱環境の変化を把握・評価することが多い。しかしながら、市街区スケールの都市温暖化やクール化に対する評価・検証を行うためには、都市の3次元幾何学構造や街路スケールの熱収支を考慮した詳細モデル化が必要である。

そこで、本研究では、3次元非定常風況モデルである Large Eddy Simulation(LES)モデルに、土地被覆状態や建物壁、地表面からの熱・水交換過程等を考慮することが可能な AUSSSM モデルを結合し、市街区における風・熱環境予測モデルとして LES-AUSSSM 結合モデルの構築を行う。また、本モデルを佐賀県島嶼域に適用し、その検証を行うとともに、広島市街区の風況特性およびクールアイランド策による気温低減効果について数値実験を行う。

2. LES-AUSSSM 結合モデル

本研究では、市街区スケールの風・熱に関わる非定常な乱流諸量を求めるために LES モデルを採用する。支配方程式は以下に示す連続式と空間フィルター化された Navier-Stokes 方程式、熱・比湿の保存式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{g}{T} (T_v - T) \delta_{i3} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{u}_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\phi}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tau_{\phi j}}{\partial x_j} + F \quad (3)$$

計算格子はスタガード格子、空間差分は2次精度中心差分、時間積分には2次精度 Adams-bashforth 法を用い、SMAC 法によって解くこととした。SGS 成分のモデル化には、Nakanishi¹⁾に倣い Sullivan らのモデルを用いて、以下の式(4)、式(5)で評価する。加えて、式(6)に示す Smagorinsky-Lilly model によって渦動粘性係数を評価する。ここで、Smagorinsky 定数 C_s は 0.18 とした。

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \mathcal{S}_{ij} - 2\nu_t \langle \mathcal{S}_{ij} \rangle + \frac{2}{3} e \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\tau_{\phi} = -\frac{\nu_t}{\text{Pr}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\nu_t = (C_s l)^2 \left[2\gamma (\mathcal{S}_{ij} - \langle \mathcal{S}_{ij} \rangle)^2 - \frac{1}{\text{Pr}} \frac{g}{\Theta} \left(\beta_\theta \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \beta_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

また、本研究で採用した AUSSSM²⁾モデルは、都市大気、土壌、建物の3つのサブモデルから成り、全体を完全連結系として扱っている。大気サブモデル内では風速、温度、比湿の鉛直1次元拡散方程式(7)を解き、乱流モデルには Gambo のゼロ方程式を用いる。また、土壌サブモデル中の地表面では、地被状態を考慮し、地中 0.5m を温度境界として1次元熱伝導方程式(8)で表す。対流熱伝達率については風速の関数として与える。

$$m \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot m \frac{\partial \phi}{\partial z}) + F_\phi \quad (7)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \alpha (T_{\text{air}} - T_s) + \varepsilon (LR - \sigma T_s^2) + (1-a)SR \quad (8)$$

土壌からの蒸発量は、蒸発比 r_e の変動を表層 0.1m の土壌含水率の関数で表す蒸発比法を用い、土壌表層の水分収支式を以下の通りとする。

$$\gamma_s \cdot \Delta z \frac{\partial \phi}{\partial t} = P - EVS - GD(\phi) + C \quad (9)$$

緑面積表層は、葉群層を熱容量無しで熱抵抗を持つと仮定し式(10)で評価し、蒸発量は土壌からの蒸発量を用いて式(11)で評価する。 κ は、実験結果により同定を行い決定する。人工被覆面上に存在する水分の蒸発量は式(12)で評価する。また、建築サブモデルは、建物熱負荷を基礎としており、建物の顕熱負荷、潜熱負荷を表現する。

$$SR + LR + CD + CV + l \cdot EVL = 0 \quad (10)$$

$$EVL = \kappa \cdot EVS \quad (11)$$

$$E = re \cdot k_x \cdot (X_s(T_s - X_a)) \quad (12)$$

モデル間の結合は、各地表面高さ 100m までの接地境界層を対象とする。各モデルの Δt に応じてパラメータ交換を行い、LES モデルと AUSSSM モデルを相互作用させる。LES モデルからは、風速の絶対値、大気温度、比湿を受け渡し、AUSSSM からは大気温度、比湿を受け渡す。これにより、日射条件の変化や地表面での水・熱交換等を考慮した大気温度、比湿が LES 側へと反映され、LES-AUSSSM 結合モデルを構築する。

3. 数値計算結果

3.1 障壁周り LES 解析

まず始めに、田村ら³⁾と同一計算条件下で、障壁周りの LES 解析を行い、本計算結果の精度検証を行った。Fig.1 は、障壁近傍における主流方向の平均流速および乱流強度の鉛直分布について実験結果と比較したものである。図より、障壁近傍及び後流域の速度分布は概ね実験値と一致しており、本数値モデルがビルなどの物体周りの風況解析に適用可能であることを示している。但し、乱流強度について、若干の不一致が見られるが、これは流入境界条件の与え方の違いであり、本モデルの精度に関わる問題ではない。なお、その他の流速成分および乱流強度についても比較を行ったが、概ね良い結果が得られることを確認した。

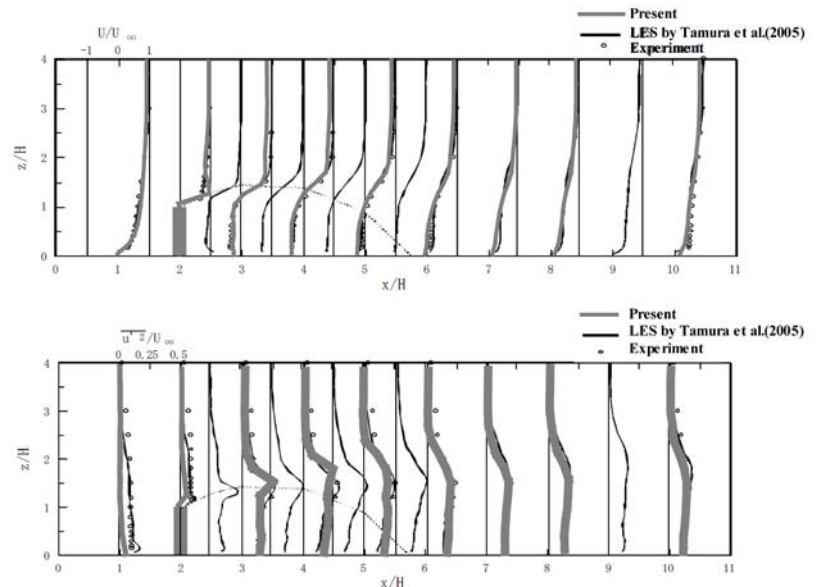


Fig. 1 障壁後流域における平均流速および乱流強度の精度検証

3.2 現地適用

次いで、本モデルを佐賀県唐津市の島嶼周りの流れ場に適用し、その精度検証を行った。その適用に際して、流入境界には、メソスケールの気象モデル MM5 の計算値を用い、30 分間の風況シミュレーションを行った。

この現地計算では、対象域を中心に、空間解像度を広領域と狭領域に分けてシミュレーションを実施し、One-way ネスティングを行った。Fig. 2 は、2ヶ所の観測ポイント（比較対象となった観測ポイント 6ヶ所で検証）について、MM5 と観測値及び本モデル結果の比較検証を行ったものである。ここで示す St.1 及び St.6 を含めて、ほとんどの観測点で概

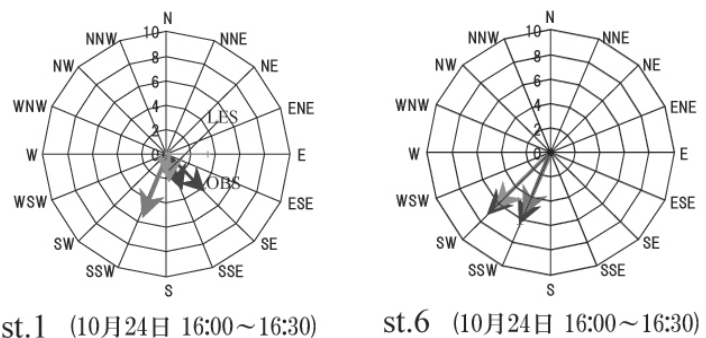


Fig. 2 現地観測および気象モデル MM5 結果と本計算結果の比較検証。

ね良い一致を示していることから、本モデルが現地風の解析に適用可能であることが分かった。また、狭領域の結果では、広領域では再現できなかった地形の遮蔽効果による風向・風速の変化を再現することが可能となり、現地観測結果に近い値が得られた。但し、いずれの観測点も流入条件に用いた MM5 の計算値に大きく依存してしまう傾向が見られた。これは、MM5 の計算結果が、乱れ成分を十分含んでいないことに起因するものであり、実際の乱流場を流入境界条件として用いるための工夫を施す必要性があると言える。

4. AUSSSM による気温低減効果の評価

ここでは、AUSSSM モデルを用いてクールアイランド策（打ち水及び屋上緑化）による熱低減効果について、数値実験を行い、本モデルの感度分析を検証した。約 50m 四方の空間内に、32m 四方のビルが建つ仮想的な領域を設定する。ビル高さは、開発モデルを適用する領域の平均建物高さ 23.8m とし、微風速場において 14 日間の計算を行う。ここでは、道路に連続散水する場合と断続散水する場合について検討を行った。連続散水の場合、14 日目の 10:00~14:00 間、常に 0.5mm の水膜が保持されるように境界条件を設定した。また、断続散水の場合は、1 時間毎に 0.5mm の水膜が回復するように境界条件を設定した。対象とする仮想領域では、ビル以外の全面をアスファルト舗装とした条件を基本ケースとして、打ち水および屋上緑化による気温低減効果を検証する。

Fig.3 は、14 日目の高度 2.5[m]までの平均気温に基づいて基本ケースとの温度差を算出し、その時系列変化を示したものである。30%の緑化を行った場合、日射量の多い時間帯において、気温低減効果が顕著に見られた。また、連続散水を行う場合と断続散水を行う場合とでは、連続散水の方が気温低減効果は高い。しかしながら、単位水量当たりの気温低減効果に換算すると、連続散水で 0.20°C/kg、断続散水で 0.25°C/kg であった。このことから、打ち水対策を行うには、時間帯やそのタイミング、さらにはその散水間隔等について、気温低減効果のより高い方を十分検討する必要があると言える。

5. 風・熱環境予測モデルの現地適用

5.1 紙屋町市街区の気流性状と熱環境

本研究で構築した LES-AUSSSM モデルを広島市中区紙屋町の市街区へ適用した一例を Fig.4 に示す。ここで、土地被覆状況は、航空写真により作成し、風速 3.0m/s を南方より定常流入させ、建物温度は 39.6°C（夏季を想定）で固定境界とし計算を行った。Fig.5 および Fig.6 は、30 分後の高さ 15m 付近における流れ場と気温分布である。風の主流方向と平行な道路では、

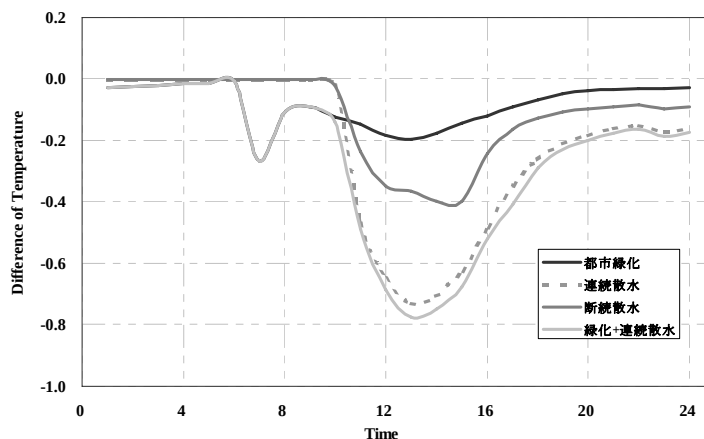


Fig. 3 AUSSSM による緑化および散水効果の検証

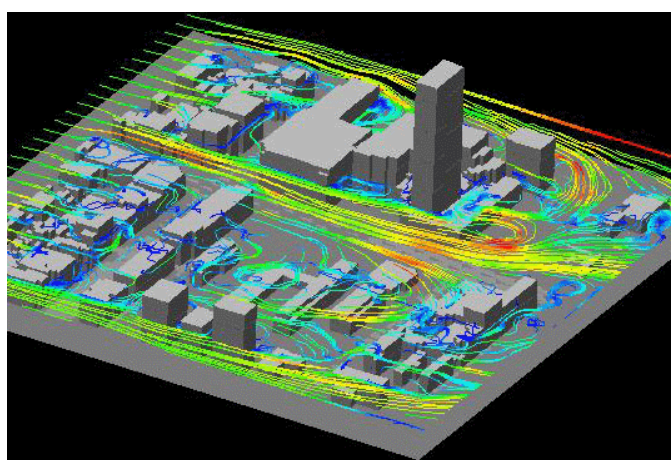


Fig. 4 広島市中区紙屋町付近の流線図の一例

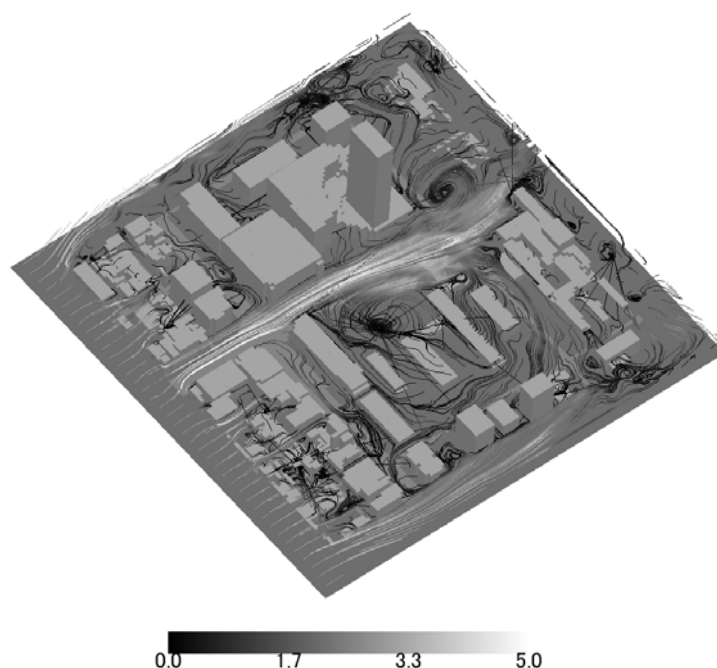


Fig. 5 定常気流状態における地表面付近の流線図

風の通り道となり、熱の移流拡散が活発となり、気温上昇は見られない。一方、高層・中層ビル背後や主流方向と垂直に交わる道路では、風の淀み域が顕著に現れ、気温が上昇傾向にあることが分かる。また、高層ビルの背面においては、上昇流が励起され、その結果として、淀み域で高温となった空気塊が上層へと移流される傾向が見られた。このことは、市街区スケールの風・熱環境を評価するには3次元非定常計算が必要であることを意味するものであり、また、ビル群による複雑な流れ場が都市の3次元熱移流に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

5.2 紙屋町での道路散水による気温低減効果の検証

前節と同一条件下で、道路散水による気温低減効果について検証する。ここでは、連続散水することを想定して、常に0.5mmの水膜が保持されるような境界条件の設定を行う。Fig.7は高さ2.5mにおける気温の水平分布を示す。なお、この図は、30分間の連続散水を行うことによる温度差を示している。風の通り道では、気温の低減効果はあまり見られない。これは、散水による気温低減効果よりも風による熱移流効果の方が卓越するためである。その一方、前節で明らかとなった高層ビル背後の温度上昇域において、気温低減効果が最も顕著であり、クーリング効果が得られた。これは、この領域で生じる上昇気流によって、地表で冷却された空気塊が上層へと運ばれるためであると考えられる。また、鉛直高さごとの気温低減効果を評価するために、同一高さの気温を平均し、その鉛直分布を調べた。その結果、散水を行った地表面付近において、気温低減効果は最も顕著であり、また、その効果は上層付近においても見られた。つまり、このような道路散水による気温低下は、対象とする市街区の水平分布のみならず鉛直分布にも及んでおり、市街区全体をクール化する対策としては有効であることが分かった。今後、さらなる数値実験による検討が必要と考える。

6. 結論

1. 本LES風況モデルを障壁周り及び現地に適用した結果、十分な精度で気流場を解析できることが分かった。
2. AUSSSMモデルによって、屋上緑化及び散水によるクールアイランド策の評価が可能である。
3. 本研究で開発されたLES-AUSSSMモデルを用いて、広島市紙屋町付近のクールアイランド策に関する数値実験を行った。その結果、ビル背後の滞留による温度上昇傾向ならびに散水による気温低減効果を評価することが可能となった。今後の課題として、交通廃熱、空調廃熱の考慮などが挙げられる。

参考文献

- (1) Mikio Nakanishi : Large-Eddy Simulation of Radiation Fog , Boundary Layer Meteorology, 94, pp.461-493 (2000).
- (2) 萩島理 : 改良-建築都市土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析, 日本建築学会計画系論文集, 第553号, pp.91-98 (2003).
- (3) 田村哲郎 : 障壁まわりの乱流場・拡散場のLES解析, 日本風工学会論文集, 第30巻, 2号, pp.21-36 (2005).

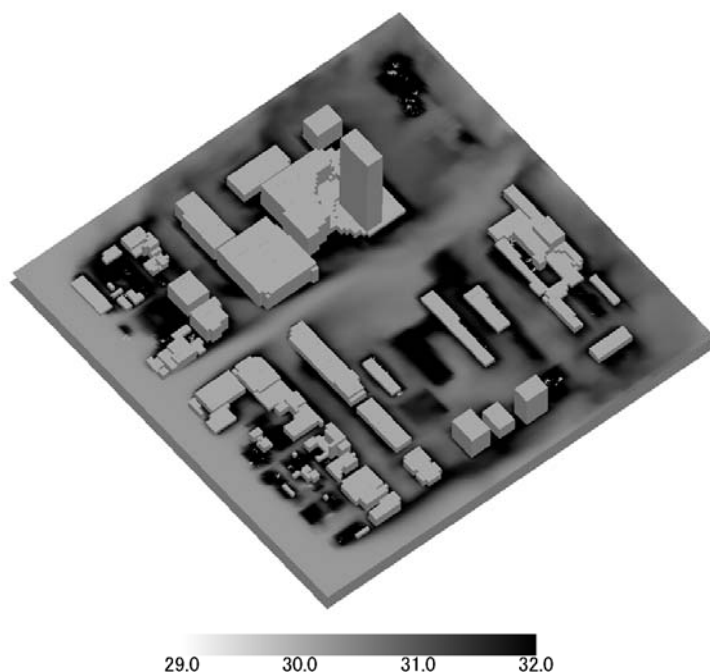


Fig. 6 定常気流状態における地表面付近の温熱分布

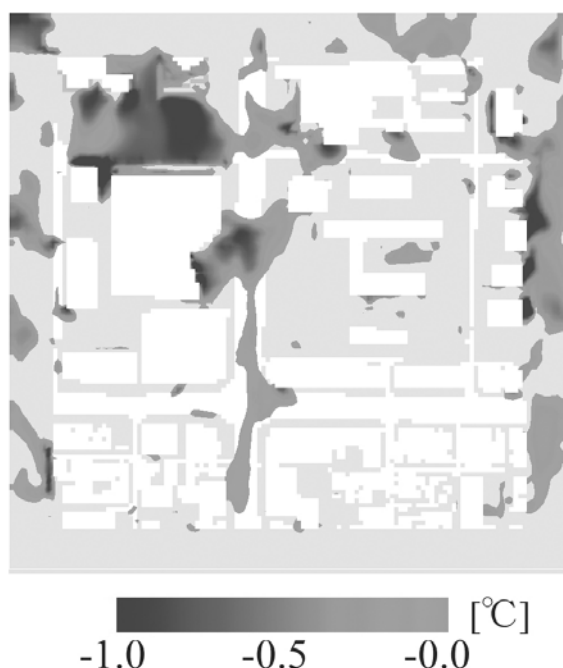


Fig. 7 散水30分後の地表面付近のクーリング効果. マイナス値は気温低減効果のあった領域。