

高反射性素材を用いた実在街区における温熱環境の緩和効果

Mitigation of thermal Environment in city block by surface material with high reflectivity

○ 古賀 佑太郎, 阪大院工, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, koga@ea.see.eng.osaka-u.ac.jp
 池島 薫, AKL, 〒160-0005 東京都新宿区愛住町 23-2, ikejima@akl.co.jp
 高橋 陽介, 阪大工, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, takahashi@ea.see.eng.osaka-u.ac.jp
 近藤 明, 阪大院工, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, kondo@see.eng.osaka-u.ac.jp
 井上 義雄, 阪大院工, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, inoue@see.eng.osaka-u.ac.jp
 Yutaro Koga, Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871
 Kaoru Ikejima, Advanced Knowledge Laboratory, Aizumi-cho 23-2, Shinjuku-ku, Tokyo, 160-0005
 Yosuke Takahashi, School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871
 Akira Kondo, Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871
 Yoshio Inoue, Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, 565-0871

Surface materials with high reflectivity could effectively mitigate urban heat island phenomena. In a real city block in Osaka City, the six cases of the 24-hour unsteady analysis for changing the reflectivity were simulated and the change of the buildings/roads surface temperature, air temperature and wind speed were discussed. The simulation results showed that the surface material with high reflectivity reduced air temperature as well as the surface temperature, but that the building surface material with high reflectivity raised air temperature near the roads compared with the building surface material with low reflectivity, and that the road surface material with high reflectivity was generally useful.

1. はじめに

都市ヒートアイランド現象は、重要な環境問題の1つであり、観測およびモデルにより多くの研究がなされている。多くの観測結果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、都市と郊外の気温差があること、日中より夜間に温度差が顕著になること、夏季よりも冬季に顕著になることが示されている。ヒートアイランド現象の要因として、地表面の変化、潜熱によるフラックスの現象、建物群による反射、輻射特性の変化、人工排熱などが考えられている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このような要因を含むマクロモデルおよびミクロモデル（CFD）の研究も多く行われている。建物群を簡略化し、日射、輻射影響を組み込んだマクロモデル⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いて、東京、大阪のヒートアイランド現象を再現している。しかしながら、多くのモデルの水平解像度は約1kmで、都市の詳細な構造を再現することはできない。都市の詳細な構造を再現し、日射および輻射の詳細は影響を考慮できる CFD⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾も研究が行われている。しかしながら、熱環境が最悪となる日中のある時刻の定常計算の実施であり、1日の非定常計算は実施されていない。

また、多くの都市は海岸沿いに位置しており、陸海風により顕著な風向の日変動⁽¹⁶⁾がみられる。建物および道路は方向により、日射を受ける量の日変動は大きく、また蓄熱により大気と熱交換量に時間遅れが生じる。このようなことから、都市の温熱環境の検討をCFDにおいて行うためには、1日の非定常計算を行うことが非常に重要である。

しかしながら、輻射や日射の影響を考慮したCFD非定常計算は、設計レベルにおいてはまだまだ普及していないのが実情である。これは、輻射計算において必要な形態係数を求めるために、膨大な計算時間を要することが主要因となっている。また、日射の計算においても太陽高度と太陽方位と、解析地点の緯度経度、対象物の置かれた方位角等の関係によって日射の影響を受ける対象物の日射による吸熱量を時刻毎に求める必要があるため、膨大な計算時間をやはり必要としている。さらに、計算対象領域外に支配される気温、風速、風向の境界条件を適切に設定する手法がないためである。そのため、屋外街区の気流検討において、日射の日向・日陰を計算要素

単位で判定した上で3次元の非定常計算を実施することはほとんど無く、予め想定した熱負荷境界条件として平均的な値を事前に設定することが一般的となっている。

著者らは、先に開発したCG法による高速輻射計算法（PPM法）⁽¹⁷⁾およびCG法による日射計算法⁽¹⁸⁾を用いることにより、日射・輻射の計算に要する時間を大幅に短縮することが可能であることを示した。

本研究では、大阪市の実在街区をモデルとして扱い、そこでの建物および道路の表面に高反射性素材を用いたことを想定し、表面反射率を変動させたときの表面温度、気温、気流の変化について評価した。

2. 解析モデル

2.1 基礎方程式

非圧縮性流体を仮定した3次元のナビエ・ストークス方程式、連続の式を有限体積法により離散化し、SIMPLE法⁽¹⁹⁾を解法に用いた。浮力の影響については、ブシネスク近似で与えた。温度については、エンタルピーの移流拡散方程式を用いた。乱流モデルには、標準K- ϵ モデルによる高レイノルズ数乱流モデルを用いた。

2.2 地表面熱収支モデル

ビル壁面や地表面では、日射および輻射の影響を考慮して、式(1)に示す熱収支バランス式から固体側と空気側への熱移動量を求めた。

$$\begin{aligned}
 & (1 - \alpha_i) (S_{Dir} + S_{Dff})_i + (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^n \alpha_j f_{ji} S_j \\
 & + \sigma \varepsilon_i (f_{sky} T_{sky}^4 + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j f_{ji} T_j^4) \\
 & = \sigma \varepsilon T_A^4 + \rho C_p c_h u_a (T_A - T_a) + k \frac{\partial T}{\partial x}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 α_i はアルベド数、 S_{Dir}, S_{Dff} は各々要素 i に到達する直達日射および散乱日射量を示す。 f_{ji} は要素 j から見た要素 i の形態係数、 S_j は要素 j に到達する全日射量、 σ はステファンボルツマン係数、 ε は輻射の射出率、 ρ は空気密度、 C_p は空気の定圧比熱、 c_h は熱移動係数、 u_a は壁面近傍速度、 T_A は要素表面温度、 T_a は要素表面に隣接する空気要素での温度、 k は固体の熱伝導率を示す。日射量 S_{Dir}, S_{Dff} は、CG 法を用いた高速日射計算手法²⁰⁾から、形態係数 $f_{i,j}, f_{sky}$ は、CG 法を用いた高速輻射計算法 (PPM 法) から算出した。式(1)の左辺第 1 項は、要素表面 i に到達する直達日射量と散乱日射量、第 2 項は要素 i に到達する他の要素からの反射日射量である。日射の反射は完全散乱反射を仮定することにより、反射成分を周囲要素に対する形態係数の重みにより他の要素へ割り振った。左辺第 3 項は、天空からの長波放射量と他の要素からの長波放射量を示す。右辺第 1 項は、要素 i から放出される長波放射量、右辺第 2 項は要素 i の表面からの顕熱フラックス、右辺第 3 項は要素 i の固体側に熱伝導により伝わる熱量を示す。なお、本研究では要素 i における潜熱フラックスについては考慮していない。

2.3 日射の計算手法

日射量の算出方法を簡単に述べる。まず、建物と道路表面の各メッシュ要素に特定の RGB 値を与える。次に、太陽方向からの平行投影図を CG で描画し、同じ色をしたメッシュの合計数 n_i (i はメッシュ要素番号) をすべてのメッシュに関して数える。そして、 n_i と遮蔽物がなくスクリーン上のメッシュ要素の数を表す N_i を比較することによって、1 つのメッシュ要素が遮られているかどうかを判断する。 N_i は簡単に計算できる。 N_i が受ける直達日射量 I_i は、条件に応じて式(2)で求めることができる。

$$\begin{aligned}
 n_i = 0 & \Rightarrow I_i = 0 \\
 n_i = N_i & \Rightarrow I_i = \beta_i A_o \\
 n_i < N_i & \Rightarrow I_i = \beta_i \frac{n_i}{N_i} A_o
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで A_o は表面要素の面積、 β_i は標準ベクトルと太陽光ベクトルの余弦である。なお、日射量の直達日射量と、散乱日射量は式(3)により求めた。

$$\begin{aligned}
 S_{Dir} &= E_{e0} P^{\cos \text{ecl}} l_i \\
 S_{Dff} &= (0.66 - 0.32 \sin h) E_{e0} \sin(1 - P^{\cos \text{ecl}}) h \\
 &\times \{0.5 + (0.4 - 0.3 P) \sin h\}
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 E_{e0} は太陽定数、 h は太陽高度、 P は大気透過程率である。以上の方法を用いて、各要素の直達日射量の散乱日射量については 2.4 節の PPM 法により天空からの建物面への形態係数を用いて案分

した。

2.4 PPM 法

形態係数の算出方法について簡単に述べる。5 面体 (四角錐) の底面を含まない側面を投影面とする本手法を、角錐投影法 (PPM 法) と呼ぶこととする。Fig. 1 に示すように球面上の天頂角 $\theta = \pi/4$ 、平面角 $\phi_0 = \pi/4$ の点 Q で球面に接する平面を投影面に選ぶ。このとき $x > 0, y > 0, z > 0$ の領域の 1/4 半球面は、三角形 CDE の内部に投影される。このように 5 面体の底面を正方形としてその対角線を xy 座標軸と一致させると、ほかの 3 つの 1/4 半球面も同様に 5 面体の側面へそれぞれ投影できる。Fig. 1 における微小面積 dS'' は、3 次元空間中の微小面積 dS が投影面である 5 面体側面 CDE 上へ投影された微小面積である。 dS' と dS'' の関係として式(3)を得た。この式は形態係数 dF が投影面 CDE における微小面積 dS'' とその位置から与えられることを意味する。よって視点 O にある単位面積の底面と、3 次元空間中の微小面積 dS との形態係数 dF は式(3)により求めることができる。

$$dF = \frac{dS'' \cos \theta \cos^3 \theta_{xy}}{\pi} \quad (3)$$

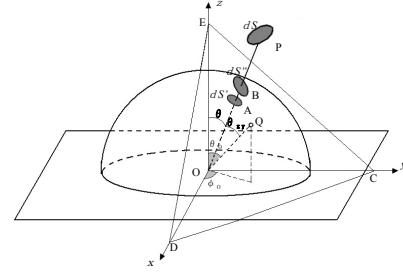


Fig. 1 Principle of Pyramid Projection Method

2.5 計算条件

計算対象領域は、Fig. 2 に示す大阪市中央区瓦町 1 の 400m × 400m の 16 ブロック街区である。境界の影響を取り除くために、計算対象領域の外側に 300m の仮想空間を設定した。そして、実線で囲まれた 4 ブロックに対して解析を実施した。また、計算対象領域内の最も高い建物高さが 151m となるため、解析空間の高さは 350m とした。CFD 解析のために作成した鳥瞰図を Fig. 3 に示す。

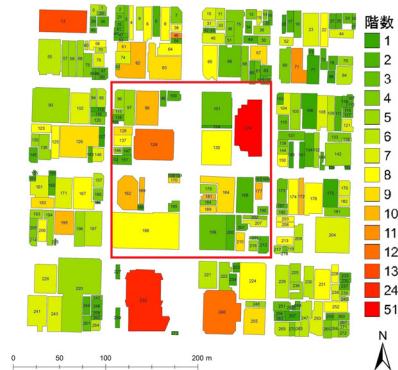


Fig. 2 Area of Calculation

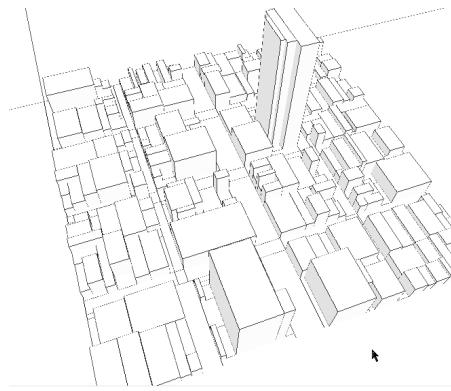


Fig. 3 CFD Model

事前準備としてWRF (Weather Research and Forecasting)を用いて、この計算領域を含む近畿圏を含む領域 (Fig. 4) を対象に、2007年8月8日から14日の1週間の計算を行い、気温の観測値と最もよく一致した2007年8月11日7時から8月12日7時までの24時間計算対象期間とした。なお、助走計算は8月11日5時からの2時間とした。

WRFの鉛直解像度はCFDに比べて粗いので、WRFの異なる2つの高度 (約30mと約200m) の気温および風速データから、Monin-Obukhovの相似則⁽²¹⁾を用いて各時刻の気温と風速の鉛直分布を求め、CFDの全ての側面境界条件とした。例として、8月11日の8:00、12:00、16:00、24:00における気温と風速のCFD境界条件鉛直分布をFig. 5～Fig. 7に示す。日中は西風、夜間は東風となり海陸風循環が生じている。また日中の大気は不安定、夜間は安定している。上端境界条件は、Monin-Obukhovの相似則から得られた高さ350mの値を一様に与えた

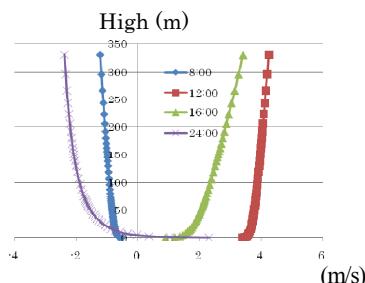


Fig. 5 vertical profile of wind velocity u

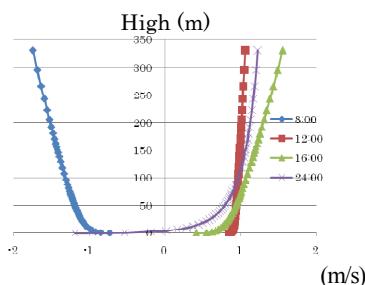


Fig. 6 horizontal profile of wind velocity v

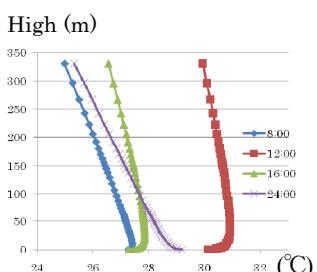


Fig. 7 vertical profile of air temperature

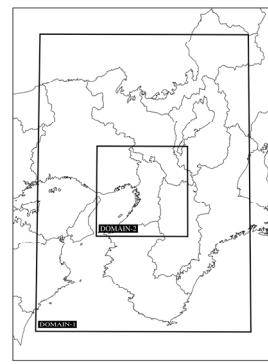


Fig. 4 Area of WRF Calculation Model

CFDの境界条件は、Monin-Obukhovの相似則から求め求めた正時における鉛直分布から線形補間を行った。

熱収支に用いた条件をTable 1に示す。また建物および道路表面に高反射性素材⁽²²⁾を用いることを想定し、Table 2に示すように6ケースの計算を行った。ここでCase2を基本ケースとする。

Table 1 Thermal Conditions

日射解析	文献 ⁽¹⁷⁾
輻射 (形態係数)	文献 ⁽¹⁸⁾
建物壁体	コンクリート (一様)
道路表面体	アスファルト (一様)
室内壁表面温度	26°C
地中	0.6mを22°C固定

Table 2 Albedo at each case

計算ケース	1	2	3	4	5	6
屋根アルベド	0.15	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40
建物側面アルベド	0.15	0.20	0.20	0.40	0.20	0.40
道路アルベド	0.15	0.15	0.25	0.15	0.15	0.25

3. 計算結果

Table 2に示した6ケースの計算を実施した。領域を真上から見た建物の表面温度及び道路面からの1.5m高さの気温分布をFig. 8に示す。また建物側面のアルベドを変更したCase2とCase4について建物側面の表面温度分布を、東側はFig. 9に、西側はFig. 10に示す。東側については日射を直接受ける午前7時～午後0時、西側は午後1時～午後6時の結果を示した。Fig. 11に午後2時における地表面の風速の絶対値を示す。もっとも気温差が出現する午後0時～2時について道路面のアルベドのみが異なるCase2とCase3の垂直断面における気温分布をFig. 12に示す。

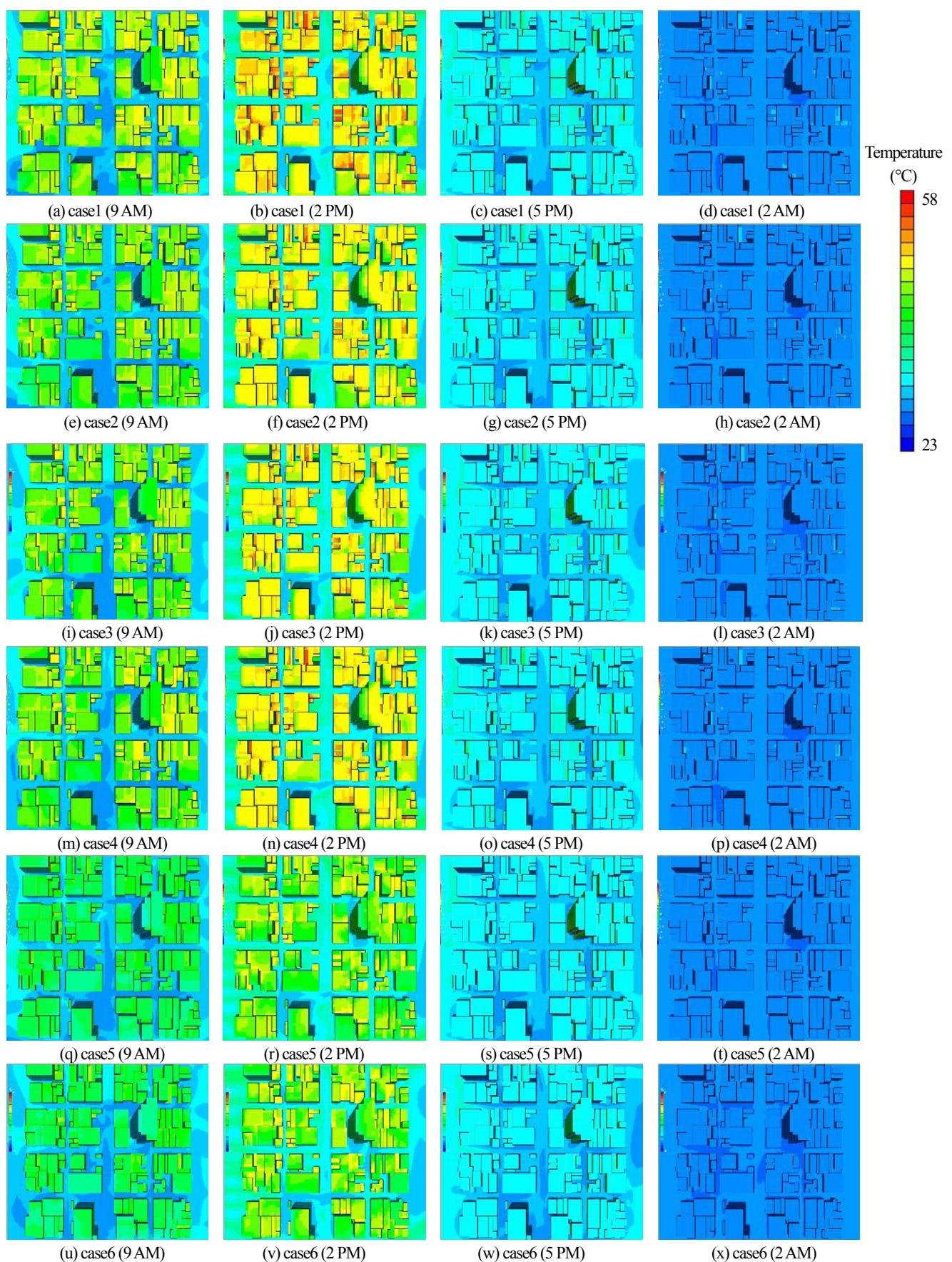


Fig. 8 Building surface temperature and air temperature at the height of 1.5m

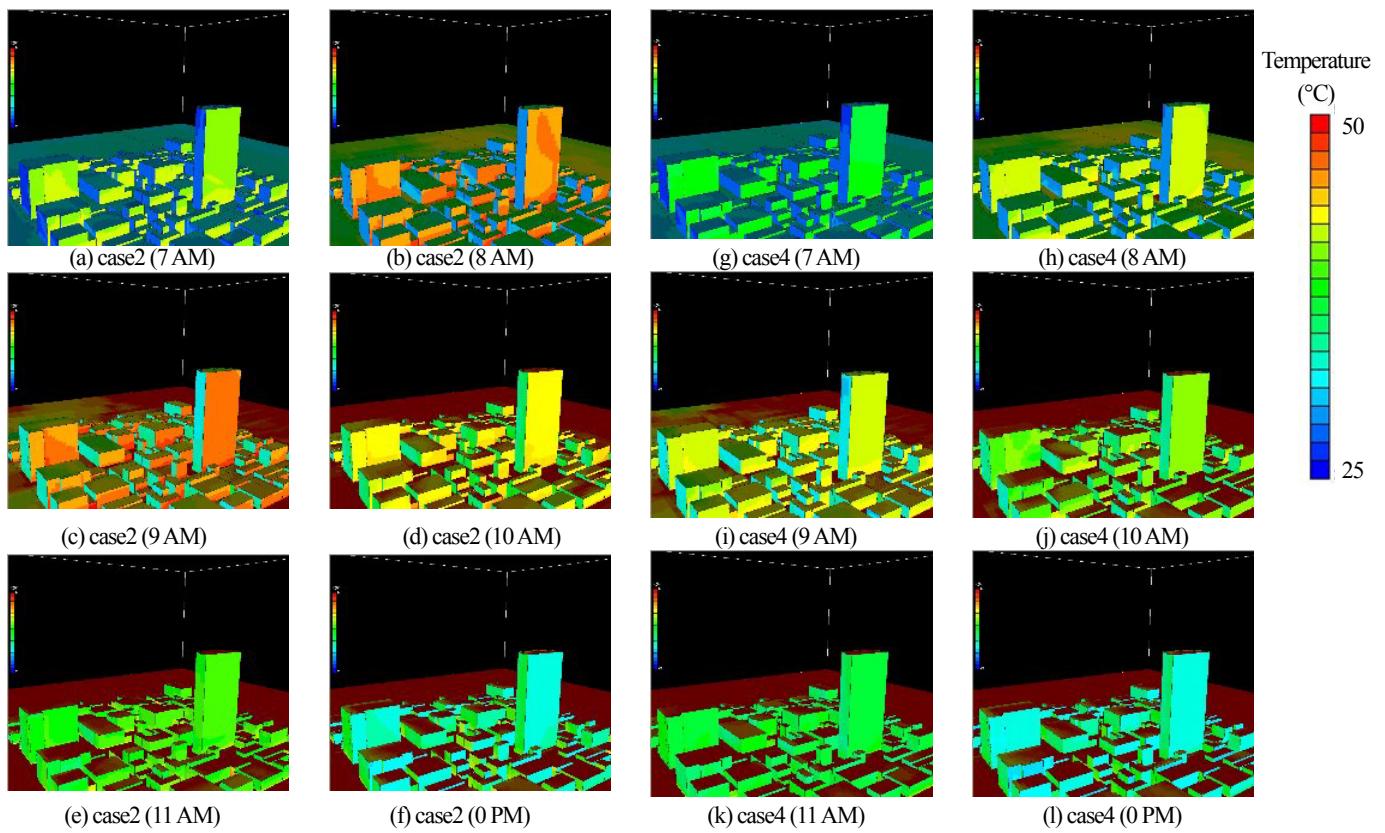


Fig. 9 Eastern surface temperature of buildings at case2 and case4 from 7 AM to 0 PM

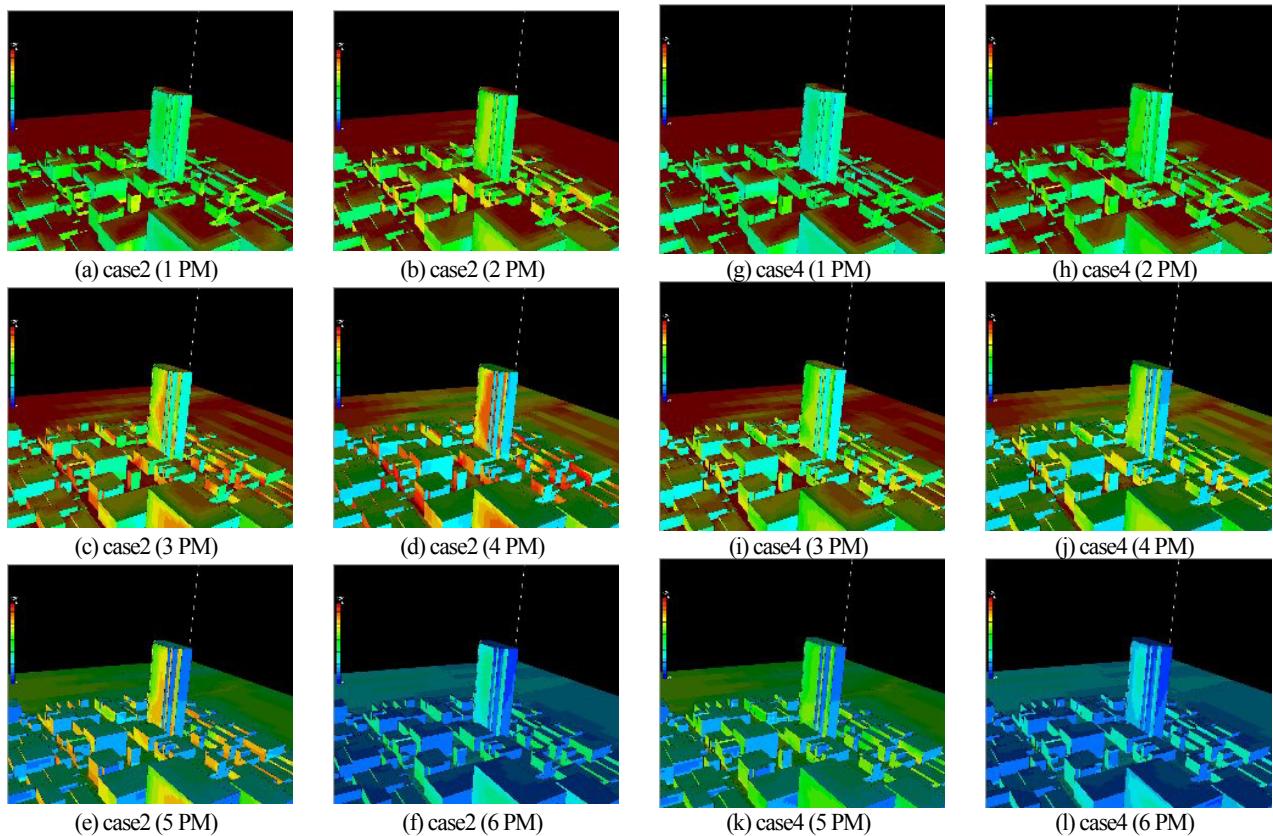


Fig. 10 Western surface temperature of buildings at case2 and case4 from 1 PM to 6 PM

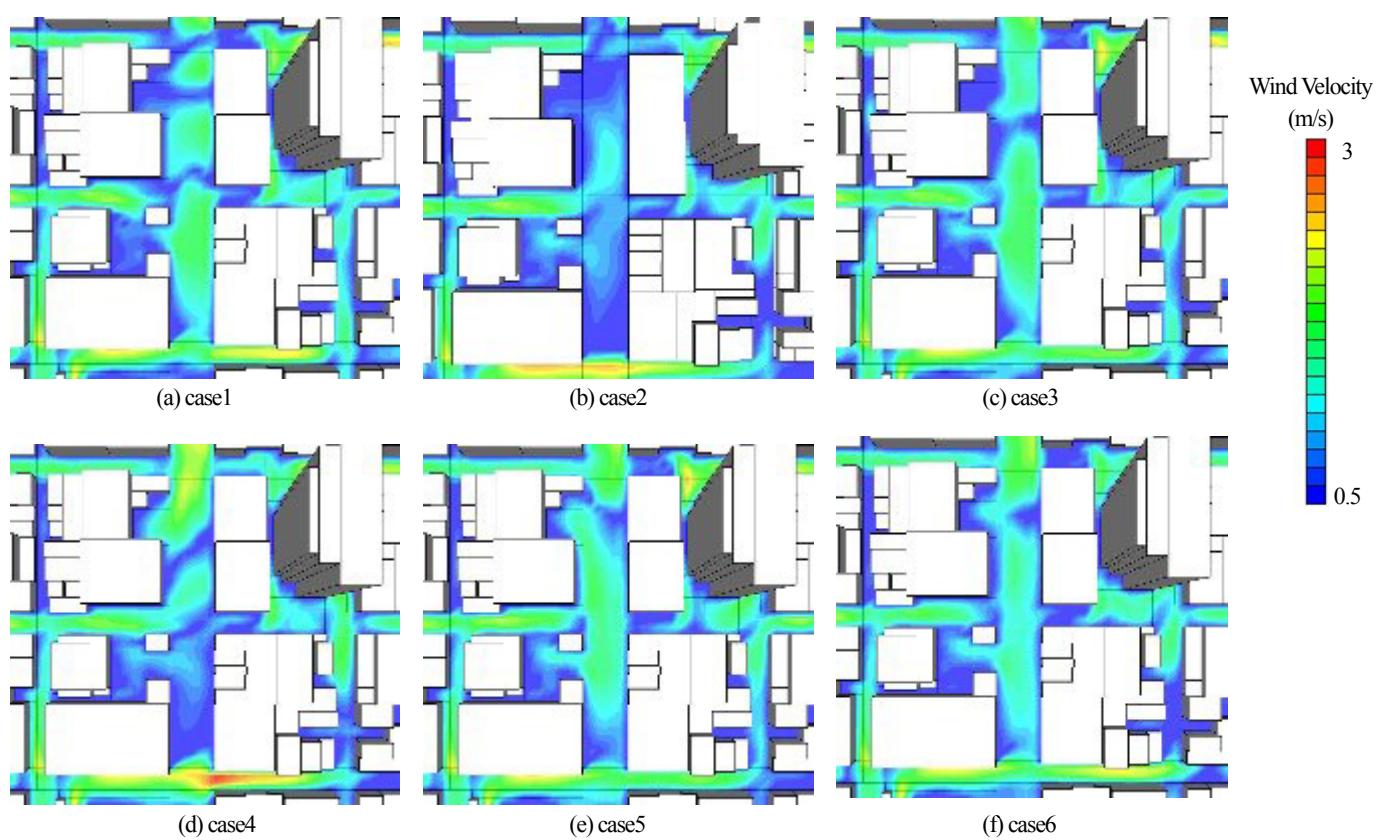


Fig. 11 Absolute wind velocity at the height of 1.5m (2 PM)

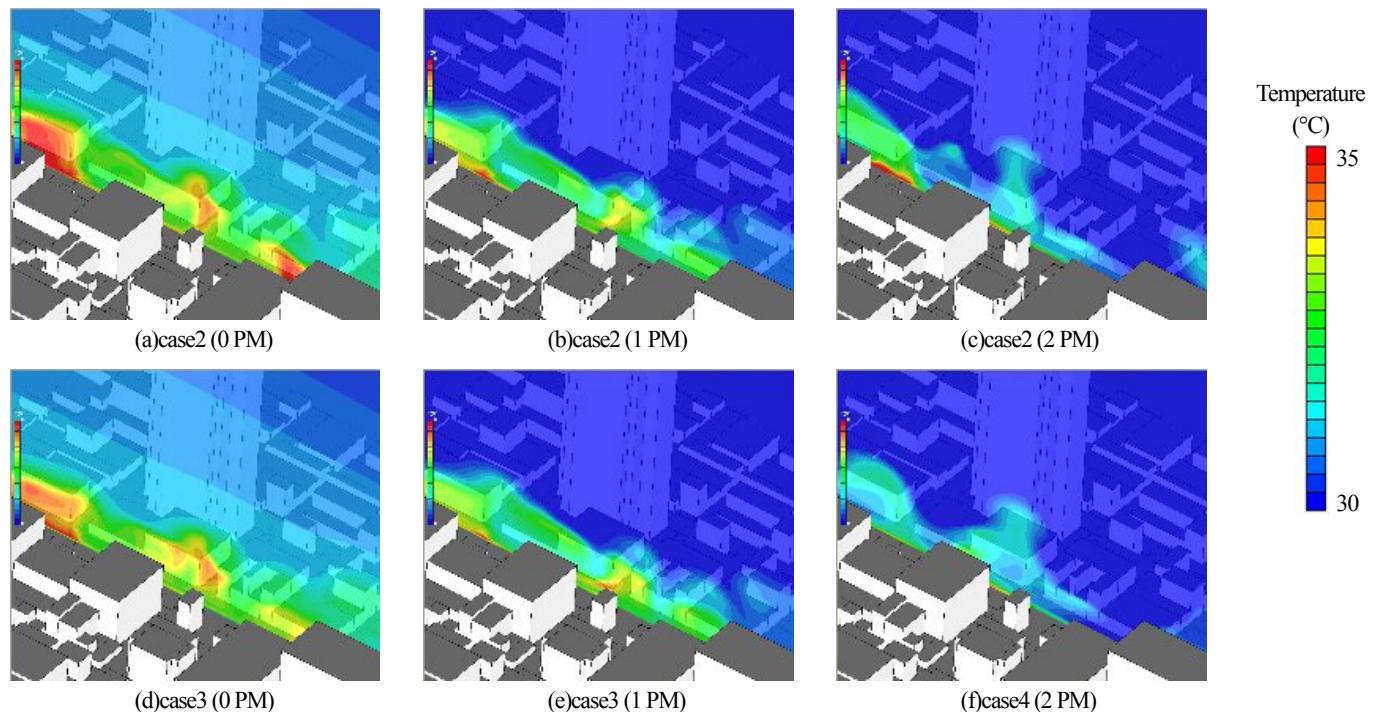


Fig. 12 Vertical distribution of air temperature

4. 考察

Fig. 8 の Case2 と Case1 を比較すると、Case2 の表面温度が全体的に低くなっている。建物表面アルベドの低下が、都市ヒートアイランド現象の要因と考えられる。Case2 と Case3 を比較すると、道路表面アルベドの上昇により、日中の道路表面温度が約 5°C 低くなつた。Case2 と Case4 を比較すると、Fig. 9 の午前および Fig. 10 の午後の結果のように太陽放射を受ける建物側面の表面温度が、著しく低下することが分かる。以上より、表面温度に寄与する最大の要因は日射であることは明白である。また、建物側面アルベドだけを上昇させた場合、建物側面の反射量が増加し、その一部が道路面で吸収されるため、道路表面温度の上昇が生じる。Case2 と Case5 を比較すると、屋根面アルベドを上昇させることにより、屋根面表面温度は約 6°C 減少するが、その影響は屋上近傍に限定され、地上 1.5m の気温にはほとんど影響を与えない。Case2 と建物側面と道路表面に高反射性素材の適用を想定した Case6 を比較すると、建物および道路表面温度は、大きく低下したが、気温への影響はあまり見られなかつた。また、アルベドの変化は、夜間気温には全く影響を与えない。

Fig. 8 の気温と Fig. 11 の風速を比較すると、風速の大きくなる領域で気温が低くなる傾向があり、風速上昇が気温低下の要因にあることを示唆している。Fig. 12 より、道路面アルベドの上昇が、地上 10m 付近までの気温に影響を与えることを示している。気温差の最大は、太陽放射が最大となる時間帯で、約 0.5°C 程度である。

以上より、表面温度を低下させるには、表面アルベドを高くすれば良いことが明確となつた。しかし、建物表面または道路表面アルベドのみを小さくすると、その表面温度は低下するが反射により他の表面温度上昇を招く危険性もある。屋上面アルベドの変化は、地上近傍の気温に与える影響はほとんどないが、街区の屋上面レベルがほぼ同一高さの場合、屋上面レベルでの気温に与える影響は無視することはできない。当然ながら、建物表面と道路表面アルベドとともに高くすると、都市ヒートアイランド緩和にもっとも有効となる。今後は、建物内部への負荷を考慮しながらよつて、最適な表面アルベドを考えていく必要があると考えられる。

参考文献

- (1) Kim Y, Baik J., "Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul," *Journal of Applied Meteorology*, 44 (2005), pp. 591–605.
- (2) Jauregui E., "Heat island development in Mexico City," *Atmospheric Environment*, 31 (1997), pp. 3821–3831
- (3) Lemonsu A., Masson V., "Simulation of a summer urban breeze over Paris," *Boundary Layer Meteorology*, 104 (2002), pp. 463–490.
- (4) Montavez J P., Rodriguez A., Jimenez J I., "A study of the urban heat island of Granada," *International Journal of Climatology*, 20 (2000), pp. 899–911.
- (5) Klysik K., Fortuniak K., "Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland," *Atmospheric Environment*, 33 (1999), pp. 3885–3895.
- (6) Giridharan R., Ganesan S., Lau S S Y., "Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong," *Energy and Buildings*, 36 (2004), pp. 525–534.
- (7) Kondoh A., Nishiyama J., "Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan," *Advances in Space Research*, 26 (1999), pp. 1173–1176.
- (8) Saitoh T S., Shimada T., Hoshi H., "Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island," *Atmospheric Environment*, 30 (1995), pp. 3431–3442.
- (9) Kondo H., Tokairin T., Kikegawa Y., "Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (2008), pp. 1655–1666
- (10) Mai Khiem., Ooka R., Hayami H., Yoshikado H., "Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan using the MM5/CMAQ modelling system," *Atmospheric Environment*, 44 (2010), pp. 4463–4473
- (11) Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., "A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models," *Boundary-Layer Meteorology*, 101 (2001), pp. 329–358
- (12) Mochida A., Isaac Y.F. Lun, "Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (2008), pp. 1498–1527
- (13) Hong Huang, Ooka R., Kato S., "Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer," *Atmospheric Environment*, 39 (2005), pp. 6362–6375
- (14) Ashie Y., Vu Thanh Ca., Asaeda T., "Building canopy model for the analysis of urban climate," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81 (1995), pp. 237–248.
- (15) Kanda M., Kawai T., Nakagawa K., "A Simple Theoretical Radiation Scheme For Regular Building Arrays," *Boundary-Layer Meteorology*, 114 (2005), pp. 71–90
- (16) D.K. Papanastasiou, D. Melas, I. Lissaridis, "Study of wind field under sea breeze conditions; an application of WRF model," *Atmospheric Research*, 98 (2010), pp. 102–117
- (17) Kaga A., Kondo A., Inoue Y., Ikejima K., "Fast Calculation Method Of View Factors Using CG Technique," (2008), 空調学会論文集
- (18) Ikejima K., Kaga A., Kondo A., 2009, Fast Calculation Method Of Direct Solar Radiation Using CG Technique, 空調学会論文集
- (19) Patankar S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," (1980), McGRAWHILL BOOK
- (20) Ikejima K., Kaga A., Kondo A., "Principle Of A High-Speed Calculation For View Factor And Solar Radiation By Computer Graphics," The 20th International Symposium on Transport Phenomena, (2009)
- (21) Roger A. Pielke, "Mesoscale Meteorological Modeling," (1984), Academic Press
- (22) Hashem A., Surabi M., Arthur R., "Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂," (2008)