

〈一般研究課題〉 再帰反射特性を有する建物外皮が都市屋外放射環境に
与える影響に関する研究

助成研究者 国立大学法人豊橋技術科学大学 袁 継輝



再帰反射特性を有する建物外皮が都市屋外放射環境に 与える影響に関する研究

袁 継輝
(国立大学法人豊橋技術科学大学)

Influence of Building Envelope with Retro-reflective Characteristics on Urban Outdoor Radiation Environment

Jihui Yuan
(Toyohashi University of Technology)

Abstract :

To achieve the research goal, this study was implemented through two main ways, (i) measurement of urban albedo and building surface temperature under diffuse highly reflective (DHR) and retro-reflective (RR) building envelope conditions by using urban block model; (ii) evaluation on the effect of DHR and RR building exterior walls on the ambient thermal environment by using full-scale wall experiment. The results showed that the RR building coatings tend to increase the urban albedo, while compared to the DHR coatings. It is also indicated that the RR coatings can relatively improve the outdoor thermal environment, and significantly reduce the external surface temperature of building walls directly related to electricity consumption for air-conditioning cooling, especially in the case of high-density (or high urban aspect ratio) urban buildings. Therefore, it can be concluded that the RR materials have the potential to improve UHI effect and conducive to building energy savings.

1. はじめに

ヒートアイランド現象の様々な対策の中で、建物外皮や屋根に、拡散型高反射(以下DHR : diffuse highly reflective)素材を適用することは、都市ヒートアイランド緩和や建物省エネルギーのための方法として広く用いられている。日射反射率の低い通常の建築外皮素材と比較して、

DHR素材は建物表面の入射する日射を大きく反射すると考えられ、それにより外壁の日射の吸収を低減することができる。その特性よりこれまで、多くのDHR材料が開発され、建築物表面や舗装に適用するために研究がされてきた [1-2]。しかし、研究によると、DHR素材は低層面や建物壁面に使用された場合、反射した日射が周辺の建物や道路に向かい吸収されてしまうことや照り返しに伴う周辺環境の悪化が懸念されている [3-4]。そこで近年、DHR素材の代わりに、太陽からの入射日射を入射方向に返す再帰反射(以下RR: retro-reflective)素材を建物壁面に適用することが提案されている。

RR素材の研究については、反射指向特性を把握するための分光器測定 [5]、及び数値シミュレーションの予測 [6-7]の研究が進められてきたが、素材の特性やメカニズムの研究が多く実空間での性能や適用性の研究が少ないのが現状である。そのため、本研究では、異なる反射指向特性(RR素材・DHR素材)を用いて都市の形状等から、i)都市模型を用いて都市アルベド(都市全体反射率)の測定、ii)実大建物外壁面模型による周辺の温熱環境を調査し、建物外皮が都市温熱環境に与える影響を探ること目的とする。

2. 実験方法

2.1 都市アルベドの予測

本研究では、図1に示すように、それぞれDHRとRR外皮素材を用いた模型の都市アルベドを規格ASTM-E1918-06 [8]による算出できる。算出式は(2-1) – (2-5)である。

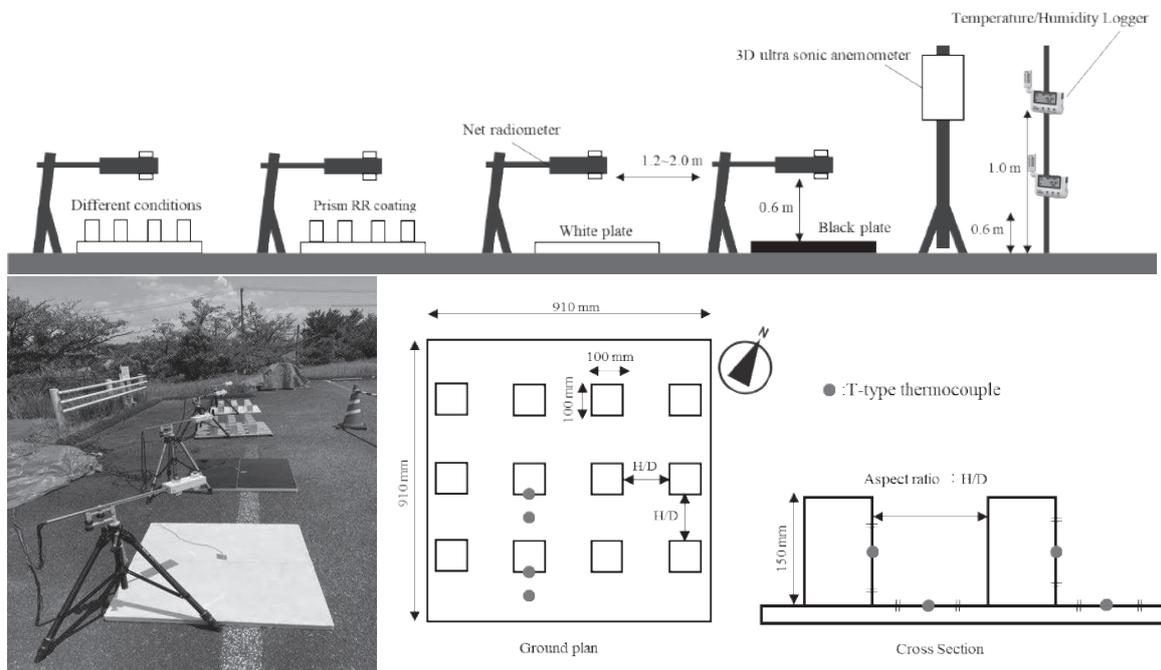


図1 都市アルベドの予測モデルの概念図と実測様子

$$J_w = [F \cdot R_w + (1 - F)R_s] I_w \quad (2-1)$$

$$J_b = [F \cdot R_b + (1 - F)R_s] I_b \quad (2-2)$$

$$J_t = [F \cdot R_t + (1 - F)R_s] I_t \quad (2-3)$$

よって、

$$R_t = R_b + \frac{J_t - J_b}{J_w - J_b} (R_w - R_b) \quad (2-4)$$

式(2-4)を変化すると、式(2-5)になる。

$$R_t = \frac{\left(\frac{J_t - J_b}{I_t - I_b}\right)R_w - \left(\frac{J_t - J_w}{I_t - I_w}\right)R_b}{\left(\frac{J_w - J_b}{I_w - I_b}\right)} \quad (2-5)$$

ここで、 J_w は白色反射板から上向き反射の日射量 [W/m^2]; I_w は白色反射板に入射の日射量 [W/m^2]; J_b は黒色反射板から上向き反射の日射量 [W/m^2]; I_b は黒色反射板に入射の日射量 [W/m^2]; J_t は異なる素材の反射外皮都市模型から上向き反射の日射量 [W/m^2]; I_t は異なる素材の反射外皮都市模型に入射の日射量 [W/m^2]; F は下向日射計から都市模型、白色反射板、黒色反射板を見る形態係数(魚眼レンズで撮って計算)[-]; R は模型の都市アルベド[-]; R_w は白色反射板の反射率(アルベド)[-]; R_b は黒色反射板の反射率(アルベド)[-]である。

また、この実験では、 $I_w = I_b = I_t$ の等式が成り立つ。

2.2 実大壁面による周辺温熱環境の測定

本研究では、図2に示すように、アイボリー系DHR素材とプリズム型RR素材を用いて、それぞれ実大壁面(910mm×1800mm)を作成し実際の屋外環境に置いて周辺温熱環境の測定実験を行う。実験条件は、アスペクト比0.5、1.0、1.5の3条件を行い、その間の空気温度、相対湿度、黒球温度、日射量、表面温度、相当外気温(SAT)を1分間隔、風速を0.1秒間隔で測定し、温熱環境指標として、①屋外平均放射温度(MRT)を考慮した新標準有効温度(SET*)、②湿球黒球温度(WBGT)、③加熱効果量(Δ COT)を算出し、2種類の壁面素材(DHRとRR)間で各温熱環境指標を比較する。各温熱環境指標を式(2-6) - (2-9)で求める。

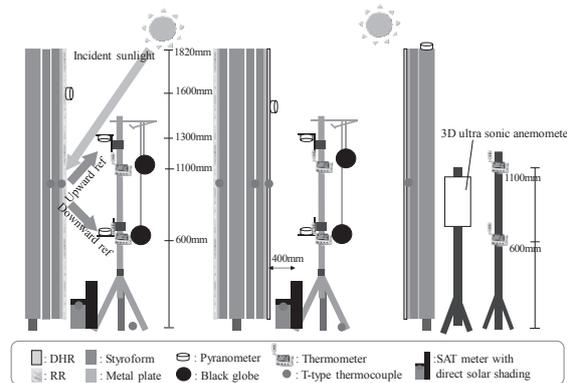


図2 実大壁面による周辺温熱環境測定

屋外MRTは黒球温度、乾球温度、及び風速の測定値より算出する。

$$MRT = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V^{0.6} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (2-6)$$

t_g : 黒球温度[°C]

t_a : 乾球温度[°C]

V : 風速[m/s]

SET*は既存の人体2層モデルにより温熱生理調節過程を考慮し、屋外気温・湿度の他に、式(2-6)で算出したMRT値を用いて算出する。仮定計算条件として、標準的な24歳男性、体重は65kg、服装のクロー値は0.2clo想定し、代謝量1.0metは歩き回る条件とする。

WBGTは日射・輻射など屋外周辺の温熱環境を考慮し、屋外実測の乾球温度、黒球温度、及び湿球温度の値を用いて算出する。

$$WBGT = 0.7t_{nw} + 0.2t_g + 0.1t_a \quad (2-7)$$

t_a : 乾球温度[°C]

t_g : 黒球温度[°C]

t_{nw} : 湿球温度[°C]

ΔCOT は壁面から下方反射日射量による短波長成分と壁面表面温度による長波長成分から成り、壁面が人体の温熱感へ与える影響について定量的に示す指標である。

$$\Delta COT = X_R \times F_f (t_f - T_a) + (A_H / \alpha_H) \times f_p \times R_S \quad (2-8)$$

$$f_p = 0.42 \cos \beta + 0.043 \sin \beta \quad (2-9)$$

X_R : 人体放射熱伝達率/総合熱伝達率 [-] (=0.5)

F_f : 人体から壁面を見る形態係数 [-] (=0.5に設定)

A_H : 人体の日射吸収率 [-] (=0.6)

α_H : 人体総合熱伝導率 [$W/m^2 \cdot K$] (=11.0)

f_p : 直達日射に対する人体の投影面積率 [-]

R_S : 下向き反射日射量 [W/m^2]

T_a : 乾球温度 [°C]

t_f : 建物外皮表面温度 [°C]

β : 太陽高度[°]

3. 実験結果と考察

3.1 異なる外皮素材による都市アルベドと壁面温度の比較

図3に素材ごとの1時間平均した都市アルベドを示す。屋根グレー色(Gray roof), 外壁DHR素材、地面グレー色(Gray ground)の条件④は全体として17.9%、屋根Gray roof、外壁RR素材、地面Gray groundの条件⑤は全体として14.2%、屋根RR素材、外壁RR素材、地面Gray groundの条件⑥は全体として20.2%であった。外壁がRR素材とDHR素材の違いの比較では、全時間平均してRR素材(14.2%)がDHR素材(17.9%)に比べて、都市アルベドが3.5%程度低い結果となった。

また、図4にDHR素材とRR素材の1時間平均した壁面表面温度を示す。全時間平均してRR素材(37.78 °C)がDHR素材(40.92 °C)に比べて約3.1°C低い値を示した。

この結果より、RR素材を使用することによって壁面や地面の表面温度を下げ、周辺の温熱環境に影響を与えている可能性が示唆され

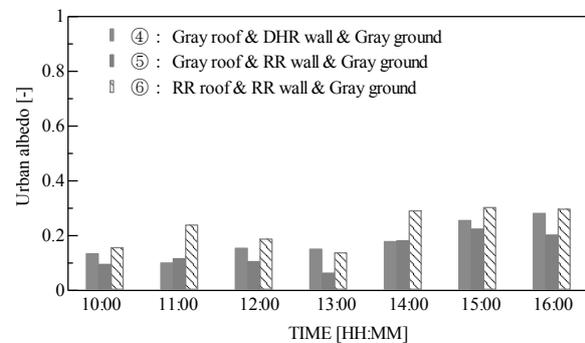


図3 異なる素材間の都市アルベドの比較

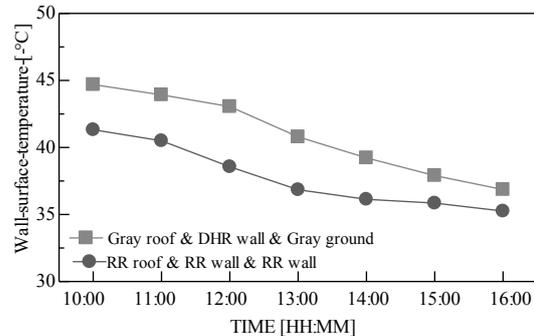


図4 異なる素材間の壁面温度の比較

た。その理由としては、RR素材の反射指向特性の影響であると考えられる。RR素材は日射を再帰反射するため、キャニオン間の多重反射の量が少なくなり、DHR素材に比べて表面温度が下がったと考えられる。

3.2 実大壁面による周辺温熱環境の測定結果と考察

図5にアスペクト比1.5の条件におけるRR素材とDHR素材の1時間平均したSET*、図6にWBGT、図7に Δ COTを示す。

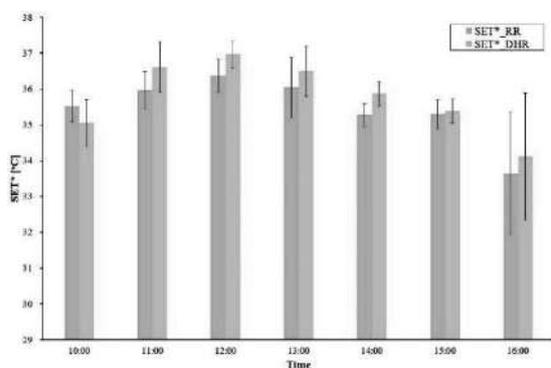


図5 異なる素材壁面間のSET*の比較

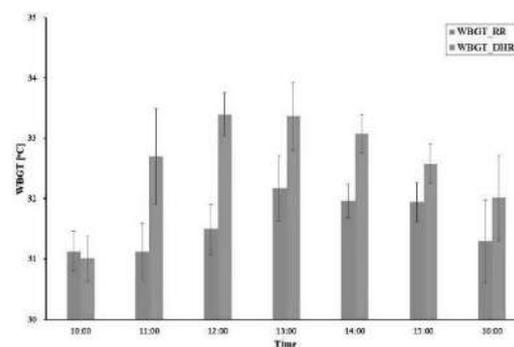


図6 異なる素材壁面間のWBGTの比較

SET*は全条件において、DHR素材よりRR素材が低値を示し、特にアスペクト比1.5の条件では、全時間平均してRR素材(35.43 °C)がDHR素材(35.91 °C)よりも約0.5 °C低い結果が確認された。WBGTは全条件において、DHR素材よりRR素材が低値を示し、特にアスペクト比1.5の条件では、全時間平均してRR素材(31.67 °C)がDHR素材(32.86 °C)よりも約1.2 °C低い結果が確認された。また、 Δ COTのアスペクト比1.5の条件では、DHR素材(4.49 °C)よりRR素材(4.05 °C)の方が全体として約0.49 °C低い値を示した。

以上の結果より、RR素材はDHR素材に比べて、都市温熱環境を軽減する傾向が見られ、建物の間隔が近い都市キャニオン間において、壁面の熱吸収・建物高温化の軽減に有効であることが示唆された。

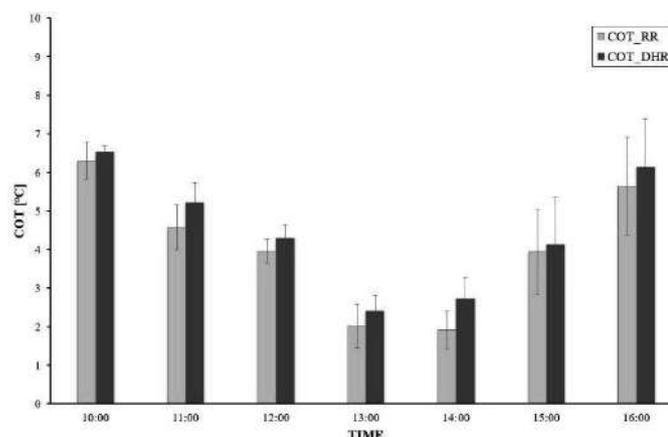


図7 異なる素材壁面間の Δ COTの比較

4. まとめ

本研究では、異なる反射素材(DHRとRR)の間で都市模型による都市アルベドの予測と実大壁面による周辺温熱環境の測定を行って比較した。

RR素材はDHR素材に比べて、都市アルベドを増加し、屋外周辺温熱環境を改善すると共に、表面温度を軽減する結果が見られた。特に高密度、高アスペクト比の都市キャニオンにおいて、冷房負荷と関係のある建物の外壁表面温度を大幅に低減できることが示されたことから、RR素材はヒートアイランド効果を改善し、建物の省エネルギーに役立つことができることが期待されるだろう。

う。

参考文献

- [1]. L. Doulos, M. Santamouris, I. Livada. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Sol. Energy*, 2004, 77 (2), 231-249.
- [2]. S.E. Bretz, H. Akbari. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy Build.*, 1997, 25(2), 159-167.
- [3]. 二岡佳子, 吉田伸治. 再帰反射材の配置の工夫が街区の日射反射特性に与える影響. *44th Symposium on Human-Environment System HES44* in Nara, 5-6 Dec., 2020
- [4]. F. Rossi, A.L. Pisello, A. Nicolini, M. Filipponi, M. Palombo. Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: a new analytical model. *Appl. Energy*, 2014, 114, 621-631.
- [5]. J. Yuan, K. Emura, H. Sakai, C. Farnham, S. Lu. Optical analysis of glass bead retro-reflective materials for urban heat island mitigation. *Solar Energy*, 2016, 132, 203-213.
- [6]. F. Rossi, A.L. Pisello, A. Nicolini, M. Filipponi, M. Palombo. Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. *Applied energy*, 2014, 114, 621-631.
- [7]. J. Yuan, C. Farnham, K. Emura. Analytical model to evaluate the reflective directional characteristics of retro-reflective materials. *Energy and Buildings*, 2020, 223, 110169.
- [8]. ASTM-E 1918- 06 (2015). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, ASTM International, ASTM, West Conshohocken, PA, 1-3.