建物屋根面の日射反射性能向上による
ヒートアイランド緩和効果REDUCTION OF SENSIBLE HEAT EMISSION BY INCREASING ROOF SOLAR REFLECTANCE
AS A COUNTERMEASURE OF HEAT ISLAND PHENOMENA

近 藤 靖 史*, 小笠原 岳**, 大木 泰 祐***, 有 働 邦 広****

Yasushi KONDO, Takeshi OGASAWARA, Taisuke OHKI
and Kunihiro UDOH

The mean air temperature in urban areas has risen due to a change of urban structure in a long term. High reflective paints can reduce a cooling load of buildings and can also improve the thermal environment in urban areas. In this paper, field measurements were carried out in a building where two areas of rooftop were finished with high reflective paint and ordinary paint. Then, the heat flux on the urban surface was calculated on the basis of heat budget equation with measured data, and the result was compared with the artificial heat release from buildings in 23 wards of Tokyo. The results of this paper show that high reflective paint is effective to resolve heat island problem. On the other hand, short wave radiation reflected at high reflective roofs may increase cooling load of neighbor buildings. In this paper, the coupled simulations of radiation and convection around buildings were conducted to estimate the influence of solar reflection at roofs on surrounding building walls. The results show that short wave radiation from high reflective roofs to neighbor building walls is much smaller than direct radiation from sun and sky to walls.

Keywords: High Reflective Paint, Heat Island, Heat Budget Analysis, CFD Simulation

高反射率塗料, ヒートアイランド, 熱収支解析, CFD 解析

1 序

近年、都市における人工排熱の増加や、舗装面および建築物増加による都市被覆の変化、都市形態の変化による都市内部の弱風化などにより、都市の平均気温は上昇傾向にある。その結果、都市の気温が都市周辺より高温となるヒートアイランド現象が引き起こされている。ヒートアイランド現象は、夏期における熱汚染であり、都市における生活の快適性を著しく損なうと共に、外気温の上昇により冷房負荷が増加し、建物冷房用消費エネルギーの増大を招く。また、消費エネルギー増大により、人工排熱量が増大するため、都市の気温をより一層上昇させるという悪循環を形成している。このようなヒートアイランド現象を抑制する手法として以下が挙げられる。すなわち、都市被覆の日射反射率を上げ、昼間において建物躯体や道路への蓄熱を抑えることができる高反射率塗料の屋根面・舗装面への適用や、日射熱を蒸発潜熱として変化させて顕熱放散量を削減することができる緑化や保水性材料の使用、建物配置等を考慮して川風・海風を積極的に取り入れるなどの対策が考えられる。

本研究では、ヒートアイランド現象の緩和対策として、都市表面

における日射受熱量を減少させ、都市大気を暖める顕熱放散量を削減する効果が期待できる建物屋根面の日射反射性能の向上(図1参照)について検討を行う。

既往の研究では、高反射率塗料を建物屋根に塗布し、夏期における塗料の室内温熱環境の改善効果が確認されている^{1)~6)}。また、高反射率塗料は、室内冷房負荷軽減だけでなく、反射日射量を増加させ、その結果、屋根面における顕熱放散量が減少し、都市の気温上昇の抑制に有効であると考えられる。

本報では、建物屋根面の日射反射性能の向上による効果を実測お

図1 建物屋根面の日射反射性能向上の概念

* 武蔵工業大学工学部 教授・博士(工学)

** 東京理科大学工学部 嘱託助教・博士(工学)
(研究当時、武蔵工業大学工学部 客員研究員)*** 大成建設㈱ 修士(工学)
(研究当時、武蔵工業大学大学院 博士前期課程)

**** 武蔵工業大学大学院 博士前期課程

Prof., Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Assistant Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.
(Visiting Researcher, Faculty of Eng. Musashi Institute of Technology)
Taisei Corporation, M. Eng.
(Formerly Graduate Student, Musashi Institute of Technology)
Graduate Student, Musashi Institute of Technology

よび熱収支解析により検討する。まず、建物屋根に高反射率塗料および一般塗料(ここでは、通常市販されている日射反射性能を向上させていない塗料を指す。)を塗布し、熱的性能を把握するための実測を行う。次に実測結果と屋根面の熱収支式により、屋根面から都市大気への顕熱放散量を試算し、屋根面の日射反射性能向上による効果を検討する。また屋根面に高反射率塗料を塗布した場合、屋根面で反射した日射が隣接建物壁面に吸収され、熱負荷の増大が懸念される。そこで本報では CFD 解析を用いて屋根面で反射する日射による隣接建物壁面の熱負荷について検討する。

2 高反射率塗料および一般塗料の熱的性能に関する夏期実測

ここでは、高反射率塗料を塗布し、日射反射性能を向上させた屋根について温度や放射熱収支の実測を行い、一般塗料を塗布した屋根と比較する。

2.1 夏期実測概要

東京都世田谷区に位置する武蔵工業大学講義棟(8 号館)屋上において高反射率塗料および一般塗料を屋根表面に塗布し、最上階である 4 階教室の室内温熱環境および屋上の屋外温熱環境の実測を夏期に行った。使用した各塗料の分光反射率^{注1)}を表 1 および図 2 に、また実測対象建物の概要を表 2 に、4 階および屋上階平面図を図 3 に示す。塗料は教室 A の屋上部分に一般塗料を、教室 B の屋上部分に高反射率塗料を塗布した(写真 1 参照)。

2.2 測定項目および測定位置

測定項目および測定位置などを表 3 に示す。測定は 2005 年 8 月 1 日から 8 月 24 日にかけて実施した。4 階教室は屋上スラブとの間に約 800mm の屋根裏空間があり、この屋根裏内の温度も測定した。教室の窓は全閉とし、白色のカーテンを閉め切り、換気を行わない状態で測定を実施した。なお対象建物の竣工は古く、屋上の構造は屋上スラブの上に防水層があるので、断熱材は施されていない。

2.3 実測結果および考察

実測期間中の晴天日を選び、これを代表日として検討する。検討に用いた代表日の全天日射量および外気温の日変化を図 4 に、風速を図 5 に示す。測定代表日は 2005 年 8 月 20 日とした。当日の最高気温は 35.7℃、最低気温は 27.6℃、日積算日射量は 24.1MJ/m²であった。

(1) 屋上表面温度(図 6 参照)

屋上表面温度を図 6 に示す。高反射率塗料を塗布した屋上表面温度は一般塗料を塗布した屋根面と比較して最大約 10℃低く、日中の温度上昇が大きく抑制されている。また夜間から朝方にかけての屋上表面温度は高反射率塗料を塗布した屋根面が 1℃程度低くなっている。このように屋根面に高反射率塗料を塗布した場合、日中は表面温度上昇が抑制されると同時に、建築躯体への蓄熱が低減され、

写真 1 各塗料塗布状況

表 1 各塗料の反射率^{注1)}

塗料種別	日射反射率 (300~2100nm) [%]	可視光反射率 (380~780nm) [%]	赤外反射率 (780~2500nm) [%]	長波放射率[%]
高反射率塗料	54.3	31.6	71.4	85.0
一般塗料	24.7	30.3	20.7	90.0

表 2 実測対象建物概要

測定対象	武蔵工業大学授業棟 8 号館 屋上、教室 A・教室 B (4 階)
主構造	RC 造
床面積	9.6[m]×8.6[m]=81.6 [m ²] (各教室)、48.0 [m ²] (廊下)
天井高	3.2 [m]
階高	4.0 [m]

表 3 測定項目および測定位置

測定項目	測定位置		測定 点数	計測機器
表面温度	屋上	屋上表面	1 塗料当 り 2 点	T 型熱電対
	4 階教室	屋上スラブ 下端表面	1 教室当 り 2 点	有線小型温湿度計 (TR-72, T&D)
		室内側 天井面	1 教室当 り 2 点	
		床面	計 1 点	
空気温度	屋上	FL+100, 600, 1,100mm	1 塗料当 り 1 点	T 型熱電対
	4 階教室	FL+1,100mm	1 教室当 り 1 点	無線小型温湿度計 (RTR-53, T&D)
		屋根裏空間	1 教室当 り 1 点	
	4 階廊下	FL+1,100mm	計 1 点	
グローブ 温度	屋上	FL+1,100mm	計 1 点	グローブ球、 無線小型温湿度計 (RTR-53, T&D)
	4 階教室	FL+1,100mm	計 1 点	
熱流	屋上	屋上スラブ 屋外側表面	1 塗料当 り 1 点	熱流計(MF-180, 英弘精機)
	4 階教室	屋上スラブ 室内側表面	1 教室当 り 1 点	
		室内側 天井面	1 教室当 り 1 点	
放射量	屋上	FL+350mm	1 塗料当 り 1 点	長短波放射計 (MR-50, 英弘精機)
外気 温湿度	屋上	FL+1,500mm (日影部)	計 1 点	無線小型温湿度計 (RTR-53, T&D)
風向・風速	屋上	FL+5,000mm	計 1 点	超音波風速計(FT702, FT)
日射量	屋上	FL+0mm	計 1 点	日射計 (MS801 英弘精機)

図 2 各塗料の分光反射率

(a) 4 階平面図

(b) 屋上階平面図

図 3 対象建物平面図

単位 : [mm]

図 4 全天日射量・外気温

図 5 風速

図 6 屋上表面温度

図 7 屋上面放射熱収支(一般塗料)

図 8 屋上面放射熱収支(高反射率塗料)

図 9 屋上スラブ下端表面温度

図 10 屋根裏空気温度

図 11 教室空気温度

(a) 放射収支 (b) 熱収支
図 12 熱収支の概念図

日没後においても表面温度を低く保つことができる。なお、屋上表面温度は一日を通して外気温より高い。また屋上表面温度のピークは12時30分頃であるのに対し、外気温は12時30分を過ぎても上昇している。

(2) 屋上面放射熱収支(図7、8参照)

一般塗料を塗布した屋上面の放射熱収支を図7に、高反射率塗料を塗布した屋上面の放射熱収支を図8に示す。高反射率塗料を塗布した屋上面の反射日射量は、一般塗料を塗布した屋上面に比べ大きい。また、図6で示したように高反射率塗料を塗布した屋上面は一般塗装表面より温度が低くなるため、長波放射量は一般塗装表面より小さい。

(3) 屋上スラブ下端表面温度(図9参照)

屋上スラブ下端表面温度(屋上スラブ室内側表面温度)を図9に示す。屋上面に一般塗料を塗布した教室Aと高反射率塗料を塗布した教室Bにおける表面温度を比較すると、正午において約1.5℃、高反射率塗料を塗布した教室Bの方が低い。教室Aと教室Bでの表面温度差の最大は蓄熱による時間遅れの影響により16時30分ころに現れ、その差は約3.9℃である。このことから高反射率塗料を塗布したことで日中の日射熱吸収を抑え、建築躯体への蓄熱が低減していることがわかる。

(4) 屋根裏空気温度(図10参照)

屋根裏空気温度を図10に示す。教室Aと教室Bの屋根裏空気温度の変化は屋上スラブ下端表面温度変化と概ね対応しており、高反射率塗料を塗布した教室Bの方が終日低い値となった。しかしその差は0.4～0.8℃とそれほど大きくない。

(5) 教室空気温度(図11参照)

教室空気温度を図11に示す。教室Aと教室Bの温度差は小さく、日中は0.2～0.4℃、日没後は0.5～0.7℃程度であった。

3 屋根面における熱収支解析

高反射率塗料は都市の土地被覆の変化や人工排熱の増加により生じたヒートアイランド現象の緩和に効果があると考えられる。また都市気温が低下すると、それに伴い冷房負荷が削減され、人工排熱量も低下するといった間接的な効果も考えられる。ここでは夏期実測結果を用いて、屋根面での熱収支を解析し、高反射率塗料の都市気候への影響を検討する。

3.1 熱収支式を用いた屋根面の熱収支解析^{5), 7), 8)}

以下に屋根面における熱収支式(図12参照)を示す。

$$R_n = V + LE + A \quad (1)$$

$$R_n = R_s + R_L = (1 - \rho_r)J + (L_a - L_e) \quad (2)$$

$$A = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

(a) 一般塗料塗布

(b) 高反射率塗料塗布

図 13 屋根面における熱収支

図 14 屋根面の顕熱輸送量

(a) 一般塗料塗布

(b) 高反射率塗料塗布

図 15 顕熱輸送量と外気・屋上表面温度差

図 16 風速と対流熱伝達率の関係

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

まず、式(4)を離散化し前進差分法で解析し、屋上スラブ内温度分布を求め^{注2)}、式(3)より屋上スラブ表面における伝導熱量 A を算出する。その際の境界条件として屋上スラブの屋外側表面温度と下端表面温度の実測値を与える。次に日射量などの実測値を用いて式(2)より正味放射受熱量 R_p を算出し、式(1)より A と R_p の残差として顕熱輸送量 V を求める。ただし夏期実測日は終日晴天であったため、式(1)中の潜熱輸送量 LE は 0 と仮定した。なお JIS R 3106 に基づいて分光光度計により測定された日射反射率と、実測において長短波放射計により測定した反射日射量から求めた日射反射率に差異が生じた。これは JIS R 3106 では日射強度の波長分布として直達日射のみを対象としていること等が影響しているものと考えられる。ここでは日射反射率の値は実測結果(高反射率塗料: $\rho_r=0.40$ 、一般塗料: $\rho_r=0.21$)を用いる。

3.2 熱収支の計算結果

(1) 顕熱輸送量の計算結果(図 13、14 参照)

図 13 に屋根面における熱収支の計算結果を、図 14 に屋根面における顕熱輸送量を示す。伝導熱量の変化に着目すると、最大となるのは一般塗料、高反射率塗料ともに午前 11 時頃である。顕熱輸送量に着目すると、日の出から 14 時 15 分頃にかけて徐々に増加し、その後減少に転じる。この顕熱輸送量の日変化は外気温の日変化と良く対応しており、熱収支解析の妥当性が確認できる。塗料別の顕熱輸送量変化に着目すると、8 時以降の顕熱輸送量の増大とともに一般塗料と高反射率塗料の差が大きくなる。日没後はその差が小さくなるが、高反射率塗料のほうが小さい値となり、日中の建築躯体への蓄熱低減が確認できる。また顕熱放散量の日積算値は一般塗料が 11.7 MJ/m^2 であるのに対し、高反射率塗料は 8.7 MJ/m^2 で約 26%

小さくなり、顕熱放散削減量は 3.0 MJ/m^2 となった。この値を用い、東京 23 区の全ての屋根を高反射率化したと想定すると、晴天日に削減される顕熱放散量は 23 区から排出される人工排熱量(建物+道路交通+工場)⁹⁾の約 37%に相当すると試算される^{注3)}。ただし、ここでは隣接建物による日影の影響や屋上に設置されている設備機器などの影響を無視している。また顕熱放散削減量は外気温、日射量、風速などの気象条件により異なるため、常に人工排熱比 37%の顕熱放散削減が見込めるわけではない。

(2) 顕熱輸送量と外気・屋上表面温度差(図 15 参照)

図 15 に顕熱輸送量と外気・屋上表面温度差を示す。外気温と屋上表面の温度差のピークは一般塗料、高反射率塗料ともに正午ごろであり、顕熱輸送量のピークとは対応しない。

(3) 風速と対流熱伝達率(図 16 参照)

図 16 に風速と対流熱伝達率の関係を示す。ここで対流熱伝達率は、顕熱輸送量を同時刻の外気・屋上表面温度差で除して算出した。図 16 からは対流熱伝達率と風速とは強い相関関係は確認できなかった。

4 屋根面の反射日射による周辺建物への影響に関する CFD 解析

高反射率塗料はヒートアイランド現象の緩和対策の一つとして考えられるが、屋根面を高反射率化した場合、屋根面からの反射日射が周辺建物の壁面などに吸収され冷房負荷増大につながる事が懸念される。ここでは CFD 解析を用いて上記の影響を検討する。

4.1 CFD 解析概要

図 17 に解析モデルを示す。ここでは低層建物屋根面から隣接建物への反射日射の影響を考察するため、高層建物および低層建物が混在した街区モデルを想定する。なお、解析モデルの対称性から 1/2 領域について解析を行い、解析日時は 8 月 19 日 12 時(太陽高

度:66.8°)とする。

4.2 解析手法

表4に地表面、建物壁面・屋根面の各面に与える条件を、表5にCFD解析の条件を示す^{注4)}。CFD解析を行う前に、壁面などの固体表面間の日射の相互反射を以下のように考慮し、壁面などの短波放射受熱量の算出を行った。

(1) 表面要素*i*が受ける直達日射エネルギー(E_{Di})

表面要素*i*が受ける直達日射エネルギー E_{Di} は式(5)で表される。

$$E_{Di} = A_i \cdot J_{DN} \cdot \sin(\theta + h) \quad (5)$$

(表面要素*i*が水平面： $h=0$ 、鉛直面： $h=\pi/2$)

(2) 表面要素*i*が受ける天空日射エネルギー(E_{Si})

表面要素*i*が受ける天空日射エネルギーは、表面要素*i*から天空を臨む形態係数 F_{is} を用いて式(6)により求めた^{注5)}。

$$E_{Si} = A_i \cdot F_{is} \cdot J_{SH} \quad (6)$$

表面要素*i*が吸収する日射エネルギー q_{Di} は式(7)により求められる。

$$q_{Di} = \alpha_i (E_{Di} + E_{Si}) \quad (7)$$

(3) 相互反射を考慮した表面要素*i*の短波放射受熱量($q_{RS,i}$)

各面が完全拡散面であると仮定し、表面要素*j*から表面要素*i*へ

の反射日射量は Gebhart の吸収係数 B_{ji} を用いて式(8)より求められる^{注5)}。

$$q_{Aji} = B_{ji} \cdot (1 - \alpha_j) (E_{Dj} + E_{Sj}) \quad (8)$$

以上より、相互反射を考慮した表面要素*i*への短波受熱量 $q_{RS,i}$ は式(9)より求められる。

$$q_{RS,i} = q_{Di} + \sum_{j=1}^n q_{Aji} \quad (9)$$

上式で求めた $q_{RS,i}$ を舗装面、壁面の各面に発熱量としてCFD解析の境界条件として与えた。一方、長波放射受量は、対流・放射連成CFD解析により各面の表面温度を求める際に組み込まれる。その際、天空面に規定する仮想天空温度 T_{sky} は、Bruntの式より求めた。人工排熱は、低層建物では壁面排出、高層建物では屋根面排出、交通排熱は地表面排出とし、各面における発熱量として規定した。

表4 地表面、建物壁面・屋根面の各面に与える条件^{注4)}

項目	舗装面		建物壁面・屋根面	
	①日照部	②日影部	③日照部	④日影部
日射(短波)	直達日射 天空日射	天空日射	直達日射 天空日射	天空日射
	法線面直達日射量：811.6[W/m ²] 水平面天空日射量：144.9[W/m ²]			
	壁・舗装面間の相互反射を考慮した受熱量を 事前に算出し、発熱量として規定			
反射日射(短波)	天空面に仮想天空温度 T_{sky} を規定：25.9[°C]			
大気放射(長波)	舗装面より 100[mm] 下の 建物内部に空調室温度を規定 温度を規定：36.1[°C]			
裏面条件	舗装面より 100[mm] 下の 温度を規定：36.1[°C]		建物内部に空調室温度を規定 温度を規定：26.0[°C]	
対流熱伝達率	ユルゲスの実験式(滑面) $\alpha_c=5.8+3.9U_m$ ($U_m\leq 5$ [m/s]) $\alpha_c=7.1U_m$ ($U_m> 5$ [m/s])			

表5 解析条件^{注4)}

解析領域	680[m](X)×85[m](Y)×400[m](Z)
メッシュ分割	138(X)×42(Y)×78(Z)=452,088[mesh]
乱流モデル	標準k-εモデル
流入条件	$U_{in} = U_A (Z/Z_A)^{0.25}$ ($Z_A = 74.6$ [m]において $U_A = 6.0, 9.0$ [m/s]) $T_{in} = 33.7$ [°C] $k_{in} = 1.5 \cdot (I_Z \cdot U_A)^2$ (乱れ強さ： $I_Z = 0.1$ [-]) $\epsilon_{in} = (C_\mu \cdot k^{1.5})/L$ $L = \{4(C_\mu \cdot k)^{0.5} \cdot Z_A^{0.25} \cdot Z^{0.75}\}/U_A$ $C_\mu = 0.09$
流出条件	自然流出
壁面応力条件	[速度] 地表面・壁面：一般化対数則 その他(上空面・側面)：Free Slip [温度] 各壁面要素(i)の温度 $\theta_w(i)$ を熱平衡式から算出 $q_{cd}(i) + q_{cv}(i) + q_{rs}(i) + q_{rl}(i) = 0$ (流入が正) ① $q_{cd}(i)$ ：壁面要素(i)での貫流熱量 ② $q_{cv}(i)$ ：壁面要素(i)での対流熱伝達量 $q_{cv}(i) = \alpha_c (\theta_w(i) - \theta_a(i))$ ③ $q_{rs}(i)$ ：壁面要素(i)での短波放射熱伝達量 短波受熱量($q_{RS}(i) = q_{Di} + \sum q_{Aji}$)を発熱として各面に規定 ④ $q_{rl}(i)$ ：壁面要素(i)での長波放射熱伝達量 $q_{rl}(i) = \sigma \cdot \epsilon \cdot \sum B_{ij} (T_{w,i}^4 - T_{w,j}^4)$
人工排熱および排出位置 ^{9),10),11)}	低層建物：7.3[W/m ²](壁面排出) 高層建物：29.6[W/m ²](屋根面排出) 地表面：10.0[W/m ²](交通排熱)

表6 解析ケース

Case	基準高さ Z_A における風速 U_A	屋根面の状態
Case 1	6.0[m/s]	一般塗料 (日射反射率：21.0[%])
Case 1-H		高反射率塗料 (日射反射率：40.0[%])
Case 2	9.0[m/s]	一般塗料
Case 2-H		高反射率塗料

※舗装面の日射反射率：7.4[%]^{注6)}

表7 各面における対流熱伝達率の想定値(ユルゲスの式による)

基準高さ Z_A における風速 U_A	地表面・低層建物屋根面の対流熱伝達率	その他の面の対流熱伝達率
6.0[m/s]	19.6[W/m ² ·K]	25.7[W/m ² ·K]
9.0[m/s]	26.1[W/m ² ·K]	35.2[W/m ² ·K]

図17 解析モデル

図 18 地表面・屋根面表面温度 単位：[℃]

図 19 低層建物屋根面から高層建物壁面への反射日射量および長波放射受熱量
(3つの高層建物の平均値、高層建物壁面への受熱を正とする)

4.3 解析ケース

表 6 に解析ケースを、各ケースの対流熱伝達率を表 7 に示す。屋根面が一般塗料の場合と高反射率塗料の場合を考え、基準高さ Z_A (本報では 74.6m) における風速 U_A をそれぞれ 6.0m/s、9.0m/s とした場合の 2 ケースを想定する。

4.4 解析結果

(1) 地表面・屋根面表面温度(図 18 参照)

地表面と屋根面の温度を図 18 に示す。 U_A が 6.0m/s の場合、高反射率塗料の場合の方が低層屋根面表面温度は最大約 6.5℃低く、高層建物屋根面は約 5.5℃低くなっており、表面温度の上昇が抑えられている。

U_A が 9.0m/s になると、 U_A が 6.0m/s の場合に比べ、対流熱伝達率が大きくなるため、一般塗料と高反射率塗料との差は小さくなり、その差は低層屋根面において最大約 5.4℃、高層屋根面において約 4.2℃とさらに小さくなる。このように、 U_A の値によって差があるが、全てのケースにおいて高反射率塗料の効果が確認できる。

(2) 低層建物屋根面から高層建物壁面への反射日射量と正味長波放射量(図 19 参照)

低層建物屋根面(GL+10m)から隣接する高層建物壁面への反射日射量および正味長波放射量を図 19 に示す。全てのケースにおいて、低層建物屋根面から高層建物壁面への反射日射量と正味長波放射量は、高さ 30~40m で最大値を示す。

一般塗料と高反射率塗料を比較すると、低層建物屋根面から高層建物壁面への反射日射量は高反射率塗料の場合の方が高く、正味長

波放射量は高反射率塗料の方が低い。また、反射日射量と正味長波放射量の和は高反射率塗料の場合の方が一般塗料より高く、その差は高さ 30~40m において、 U_A が 6.0m/s の場合で 7.6 W/m²、 U_A が 9.0m/s の場合で 8.3W/m² 程度である。しかし、本解析で想定した鉛直面での天空日射量は約 72W/m² であり、これと比較すると高反射率化した建物屋根面から周囲への建物への影響は小さいと考えられる。

5 結論

建物屋根面の日射反射性能を向上させた場合のヒートアイランド緩和効果を夏期実測、熱収支解析および CFD 解析の結果により検討した。

- (1) 夏期に行った実測において、高反射率塗料を塗布した屋上表面温度は一般塗料を塗布した屋上面と比較して最大約 10℃低くなり、日中の温度上昇が大きく抑制された。
- (2) 夏期実測結果を用いて、屋根面における熱収支解析を行った。高反射率塗料を屋根面に塗布した場合、正味放射受熱量 R_n の削減に伴い、屋根面から都市大気への顕熱放散量 V が減少した。
- (3) CFD 解析により、屋根面からの反射日射による隣接建物壁面への影響を検討した。低層建物屋根面を高反射率化した場合、隣接建物への反射日射の影響はあるものの、天空日射量などに比べるとかなり小さい。

以上の結果から、高反射率塗料のヒートアイランド現象緩和効果

を確認することができた。

謝 辞

高反射率塗料および一般塗料の日射反射率の測定を(財)建材試験センターに、舗装面の日射反射率の測定を(株)日本ペイントをお願いした。また、計測機器を大成建設(株)、東急建設(株)、三井住建道路(株)よりお借りした。実測では、鹿児島大学・長澤康弘氏(当時、武蔵工業大学技術員)、小山田早希子氏(当時、武蔵工業大学学生)、天明望氏(同)をはじめとする多くの方々に協力を賜った。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

1) 近藤・長澤・入交:高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象緩和に関する研究:空気調和・衛生工学会論文集 No.78, pp.15-24. 2000 年 7 月
2) 近藤・長澤・大南:黒色高反射率塗料による住宅屋根の日射反射性能の向上:日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)D-2 環境工学Ⅱ, pp.117-118. 2002 年 8 月
3) 近藤・大木・光本:実測による高反射率塗料の遮熱性能に関する研究:日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)D-2 環境工学Ⅱ, pp.261-262. 2005 年 9 月
4) 近藤・大木:実測と数値シミュレーションによる高反射率塗料の遮熱性能に関する研究:空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌), pp.217-220. 2005 年 8 月
5) 竹林・森山・野上ら:屋上緑化及び高反射塗料の表面熱収支結果:日本建築学会学術講演梗概集(近畿) D-2 環境工学Ⅱ, pp.41-44. 2005 年 9 月
6) 西村・松尾・三木・村瀬:太陽熱高反射塗装の日射熱防除効果:日本建築学会学術講演梗概集(東海)D-2 環境工学Ⅱ, pp.377-378. 2003 年 9 月
7) 近藤純正:地表面に近い大気科学:東京大学出版会 2000 年 9 月
8) 近藤純正:水環境の気象学:朝倉書店 1994 年 4 月
9) 足永・李・尹:顕熱潜熱の違いを考慮した東京 23 区における人工排熱の排出特性に関する研究:空気調和・衛生工学会論文集 No.92, pp.121-130. 2004 年 1 月
10) 萩島・谷本・片山・宮原:建物空調排熱位置及び都市形状の実態に関する調査:日本建築学会環境系論文集 第567号, pp.65-72. 2003年5月
11) 陳・大岡・黄・中嶋:建物壁面からの顕熱放散や建物の人工排熱の屋外温熱環境に関する影響度の研究(その 1)(その 2)屋外温熱環境への影響度の概要と均一市街地への適用:空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌), pp.2197-2204. 2005 年 8 月

注

注1) 高反射率塗料および一般塗料ともに灰色(N60)とした。分光反射率の測定は JIS R 3106 に基づき、波長 300~2500[nm]での分光反射率(正反射+拡散反射)を測定し、日射強度分布に重み付け平均することで日射反射率の測定を行った。また長波放射率の測定はフーリエ変換赤外分光光度計((株)島津製作所:FT-IR)を用いて行った。なおこれらの測定は(財)建材試験センターに実施いただいた。
注2) 実測対象建物は竣工後相当年経過しており、詳細図が無かったためスラブ厚は推定値(200[mm])とした。なお、断熱材は施工されていない。また熱流計により屋上スラブ面の熱流を測定したが、十分な精度の結果が得られなかった。このため、式(3)、(4)により伝導熱量 A を求めた。
注3) 本報では、「各区の面積に対する建物の全屋根面積の割合」=「グロス建蔽率」と仮定し、各区面積にグロス建蔽率を乗じて高反射率塗料を塗布する総面積を計算した。ここで、グロス建蔽率とは各地区の面積に対する建物投影面積の割合であり、東京都公式ホームページ

(<http://www.metro.tokyo.jp/>)に示されている値を用いた。

注4) 日射量・地面裏面の内部温度(GL-200mm)・仮想天空温度を求める際の大气放射量、外気温(流入空気温度)は別途行った道路舗装面に関する夏季実測(2006 年 8 月 19 日 12 時)における実測値を用いている。全天日射・地面裏面の内部温度については 12 時~14 時の平均値を用いた。
注5) 本報では Gebhart の吸収係数 B_{ij} はモンテカルロ法を用いて算出した。図 17 に示す街区モデルの固体表面を表面要素に分割し、各表面要素から粒子を発生させ、追跡する。粒子がある固体表面に到達した場合、0 から 1 の乱数を発生させ、乱数が放射率以下であれば吸収、放射率以上であれば反射させ、反射の方向はランバートの法則(乱反射)によるものとする。最大反射回数を 100 回とし、 i 面から発生させた粒子のうち最終的に j 面に吸収された粒子数を集計して、 i 面の発生粒子数との比を B_{ij} とした。天空率も同様に求めた。ただし、鉛直壁面で対向する位置に他の壁面などがない場合において、天空率が 0.5 とならない場合があったが、この場合は天空率を 0.5 とした。なお、天空率を求める際は全ての面の放射率を 1.0 とし、Gebhart の吸収係数を求める際は一般塗料面の放射率を 0.79、高反射率塗料面で 0.60、地表面で 0.93、天空で 1.0 とした。
注6) 舗装面の日射反射率は(株)日本ペイントで測定されたものを提供していただいた。

[記号表]

A	: 伝導熱量 [W/m ²]
A_i	: 表面要素 i の面積[m ²]
B_{ij}	: Gebhart の吸収係数[-]
C_p	: コンクリートの比熱 [kJ/kg・K](=0.88)
E_{Di}	: 表面要素 i への直達日射エネルギー[W]
E_{Si}	: 表面要素 i への天空日射エネルギー[W]
F_{is}	: 表面要素 i から天空面へ臨む形態係数(天空率)[-]
h	: 太陽高度[°]
J	: 全天日射量 [W/m ²]
J_{DN}	: 法線面直達日射量[W/m ²]
J_{SH}	: 水平面天空日射量[W/m ²]
k_{in}	: 乱流エネルギー[m ² /s ²]
q_{Aij}	: 表面要素 i で反射した日射量 S_{Ri} の中で、表面要素 j に到達し吸収される日射量 [W]
q_{Di}	: 表面要素 i が吸収する日射量[W]
$q_{R.S.i}$	: 表面要素 i への短波放射受熱量[W]
LE	: 潜熱輸送量 [W/m ²]
L_a	: 大気放射量 [W/m ²]
L_e	: 屋根面からの長波放射量 [W/m ²]
R_n	: 正味放射受熱量 [W/m ²]
R_S	: 短波放射による受熱量 [W/m ²]
R_L	: 長波放射による受熱量 [W/m ²]
T	: 温度 [°C]
T_a	: 外気温 [K]
T_{in}	: 流入空気温度[°C]
T_s	: 屋根面温度 (屋上表面温度) [K]
TI	: 乱れ強さ[%](=10)
U_A	: 基準高さ Z_A における風速[m/s]
V	: 顕熱輸送量 [W/m ²]
α_i	: 表面要素 i の日射吸収率[-]
α_c	: 対流熱伝達率[W/m ² ・K]
ε	: 長波放射率 [-] (高反射率塗料・一般塗料: 0.90)
ε_{in}	: 乱流消失率[m ² /s ³]
ρ_r	: 日射反射率 [-](高反射率塗料: 0.40, 一般塗料: 0.21)
ρ	: コンクリートの密度 [kg/m ³](=2200)
σ	: ステファン・ボルツマン定数(5.67×10 ⁻⁸) [W/m ² ・K ⁴]
θ	: 表面要素 i における外向き法線ベクトルに対する太陽光の入射角[rad]
λ	: コンクリートの熱伝導率 [W/(m・K)](=1.62)

(2007年12月10日原稿受理, 2008年4月7日採用決定)