

都市環境に配慮した高反射率塗料による熱負荷軽減技術の開発・評価 —温度測定による塗面の絶対反射率の推定—

酒井 英樹, 永村 一雄, 土井 正

大阪市立大学大学院生活科学研究科

Evaluation of High Reflective Paints for Improving Environmental Conditions in the Cities

Hideki SAKAI, Kazuo EMURA and Tadashi DOI

Graduate School of Human Life Science, Osaka City University

Summary

High reflective paints can reduce the heat island effect by reflecting solar energy. However, it is difficult to measure absolute value of reflectance directly by a spectrophotometer. Therefore, by monitoring the surface temperature of samples, heat flows into and out of samples are calculated and absolute values of their reflectance are estimated. These estimated values agree well with relative values of reflectance measured by an ultraviolet-visible-infrared spectrophotometer against powder of barium sulfate as a standard. This simple estimation method can be used to measure the distribution of solar energy reflected by high reflective paints, which do harm the urban environment.

Keywords : 高反射率塗料 *High Reflective Paint*, ヒートアイランド *Heat island*, 都市環境 *urban environment*

1. はじめに

近年, 日本各地の大都市では, ヒートアイランド現象と呼ばれる気温の上昇が顕著となり, 真夏日, 熱帯夜日数とも, 増加の一途にある [1, 2]。今日の都市は, そのほとんどの地表面がコンクリートやアスファルトなど蓄熱しやすい人工物で覆われ, そこに, 都市活動による巨大な人工排熱が加わることで, 地表面の熱収支が変化し, 都市全体が高温化するまでに至っている。その結果, 夏の暑さは増幅され, 都市の居住環境は, 著しく損なわれている。早急な行政的対応策を講じる必要がある。

こうした事態に対応するために, 各方面から温暖化防止策が研究されている。2004年3月に政府により発表されたヒートアイランド対策大綱 [3] では, その対策として, 人工排熱の低減, 地表面被覆の改善, 都市形態の改善, ライフスタイルの改善, を掲げている。大阪市内

においても, 2005年3月に大阪市ヒートアイランド対策推進計画 [4] を策定し, 2020年度までに, 年平均気温の上昇傾向を抑え, 熱帯夜日数の増加を食い止めることを目標に掲げている (大阪の現状は, 1994 ~ 2003年10年間平均で, 年平均熱帯夜日数42.2日, 年平均気温17.1℃。対策を取らない場合, 今後15年間で, 年平均気温が0.3 ~ 0.45℃上昇すると推定されている)。これらの目標達成のために, 都市環境に配慮した合理的かつ効果的な環境配慮技術の開発・評価が求められている。

本研究では, 地表面被覆改善の1つの手だてとして, 高反射率塗料による建築物の熱負荷軽減技術の開発および評価を行う。高反射率塗料による熱負荷軽減技術とは, 日射反射率の高い塗料を建築物外壁に使うことで, 日射から受ける建物への吸収熱量を減らし, 建築物の表面温度上昇を抑えるというもので, 仕組みはいたって単純で

ある[5]。建築分野における同様の改善手法としては、ビルの屋上緑化がよく知られているが、緑化と比べて、高反射率塗料は、施工上の制約が少なく、水分の補給が必要な緑化と異なり、メンテナンスはほとんど必要ない、といった利点がある。緑化には、大気浄化、日陰の提供など複合的な効果があり、高反射率塗料の技術が、緑化対策すべてに置き換わるものではないが、緑化が難しい高層ビルや既存の建築物へヒートアイランド対策を広げることができるため、簡便で汎用性の高い方法として、注目されている。

しかし、実物件への応用の面では、これまでの研究で、つぎのような問題点が指摘されている。

- 1) 高反射率塗料による熱負荷軽減効果の評価方法が確立していない[6-11]。
- 2) 都市建築物で高反射率塗料を使用する場合、単にその建築物への熱の侵入を防いだとしても、反射した日射が周辺の建築物や道路等に吸収されてしまうと、都市全体としての熱負荷は変わらず、ヒートアイランド現象の緩和にはつながらない[12]。
- 3) 冬期においては、暖房エネルギーの増加が見込まれ、省エネルギーの観点からはマイナスの効果もある[6]。

これらの問題の要因としては、日射エネルギーの約半分を占める近赤外線に対する反射率の絶対値測定、および、ある角度で入射された近赤外線がどの角度へ反射されるかという反射指向特性の測定が難しいことが挙げられる。測色の分野では、可視域の反射率の絶対値(絶対反射率)は、ほぼ100%の反射率を示す標準試料(BaSO₄粉末)に対する相対反射率を分光光度計で測定し、計算によって求めるのが一般的である[13]。しかし、近赤外域では、BaSO₄粉末の反射率は低下し、さらに、水分吸収の影響を受けやすくなることなどから、分光光度計により光学的に絶対反射率を求めることは難しい。一方の反射指向特性に関しても、反射率測定には、積分球を使用し、全反射成分を受光して測定することが一般的であり、その反射特性を求めることは難しい[14]。

そこで、本研究では、近赤外域での反射測定の方法として、光度計を用いる光学的な測定ではなく、試料に近

赤外線を照射した際の温度上昇、つまり温度測定から、吸収熱量を算出することで、絶対反射率を簡便に推定する方法を検討した。この方法によれば、反射後の近赤外線を熱の移動として捉えることで、試料の近赤外線に対する反射指向性も測定することができるため、高反射率塗料による熱負荷軽減技術の評価手法として、有効である。

2. 実験方法

2.1 試験試料

試験試料には、ガルバリウム鋼板(75mm×70mm, 0.6mm厚)上に塗料メーカーによって塗布された塗面を用いた。試料として、遮熱塗料3色(日本ペイント社製フッ素樹脂塗料ATTSU-9, 白色, クリーム色, 黒色), および、遮熱塗料とほぼ同じ色調をした一般塗料2色(白色, 黒色), さらに、金属光沢面として、未塗装ガルバリウム鋼板を用いた(表1)。

ここで、本論文における一般塗料、遮熱塗料の定義、高反射率塗料との関係について、説明する。

一般塗料とは、従来から使われている一般的な塗料、という意味である。これらは、色の見えに関係する可視領域における反射率のみに着目して設計された塗料である。可視域における反射率と近赤外における反射率は相関が高い顔料が多く、結果として、白や淡色など可視域で反射率の高い塗料は、近赤外域でも反射率が高く、黒や濃色など可視域で反射率の低い塗料は、近赤外域でも反射率が低い傾向にある。

遮熱塗料とは、可視域における反射率を設計するさいに、近赤外で反射率が高い顔料を選択的に使用することで、さまざまな色をしめしつつも、近赤外域における反射率を一般塗料に比べて高めた塗料である。

一方、高反射率塗料という言葉は、日射反射率が高い(つまり、可視から近赤外に渡って高い反射率を保つ)塗料をさす。すでに説明したように、これを建築物外壁に使うことで、日射から受ける建物への吸収熱量を減らし、建築物の表面温度上昇を抑えることができる。日射熱を遮ることができるため、遮熱効果、または、断熱効

表1 照射実験条件

試験試料	遮熱塗料(白, クリーム色, 黒), 一般塗料(白, 黒), 未塗装ガルバリウム鋼板
試験寸法	75mm×70mm, 0.6mm厚
照射熱源	東芝, 赤外線医療用電球IRYO 100/110V60WR *1
照射条件	入射角45度, 距離300mm
測定環境	恒温器内にて測定(庫内温度25°Cに設定)
温度測定	T型熱電対

*1 0.7~1.4μmの赤外線を多量に放射するように設計されている。

果がある、と言われる。ただし、現状では、日射反射率が何%以上であれば高反射率塗料である、という明確な規定はない。一般塗料では、白および淡色が、高反射率塗料に分類される。遮熱塗料では、日射エネルギーの約半分を占める近赤外線に対する反射率は高いが、のこり半分を占める可視光に対する反射率は、塗料の色によって異なる。よって、すべての遮熱塗料が、高反射率であるという訳ではないが、同じ色の一般塗料にくらべれば、近赤外域の反射が高い分、遮熱、断熱効果がある。

2.2 照射実験

表1の6種類の試験試料を、庫内温度25℃に設定した恒温器（東京理化器械KCL-1000）の中に垂直に設置し、上方斜め45度、距離300mmから60Wの赤外線ランプ（東芝製）を照射し、試料裏面中央部に取り付けたT型熱電対で試料温度 θ_1 を測定した。試料の裏面は、厚さ60mmの発泡スチロール（熱伝導率 $d=0.04$ [W/(m·K)]）で断熱した。実験条件を表1にまとめる。本来、照射熱源には、日射を用いるべきであるが、今回は、温度測定に基づく反射率の推定という評価手法そのものの検討であるため、同じ条件で繰り返し測定が可能である赤外線ランプを採用した。なお、恒温器の中は、下から上に向かって強制排気される。試料表面における強制対流熱伝達を防ぐために、試験装置全体を上方を除いてアクリル容器で覆った（図1）。アクリル容器内の温度を熱電対で2カ所測定し、その平均値を周辺温度 θ_2 とした。温度測定は、照射開始後、温度の上昇が収まり、定常状態になるまで（30分間）続けた。

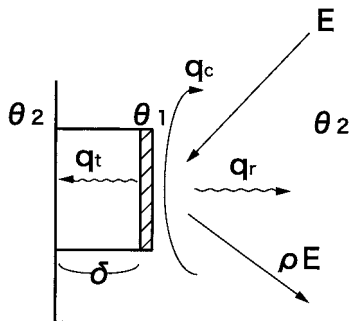


図1 照射実験の配置図（熱の流れ）

定常状態において、赤外線ランプから照射されたエネルギー E は、一部反射され（ ρE 、 ρ は反射率）、残り $(1-\rho)E$ は、試料に吸収されたあと、熱伝導（ q_t ）、熱対流（ q_c ）、熱放射（ q_r ）によって、放出される。試料面の温度を θ_1 、周辺温度（断熱材厚み δ ）端、アクリル容器内空気温度）を θ_2 とする。

2.3 分光反射率測定

各試料の相対分光反射率 $\rho(\lambda)$ は、紫外可視近赤外分光光度計（島津製作所UV-3600）により、波長 λ

=300～2500nmの範囲で、 $BaSO_4$ 粉末を反射率1の基準として求めた。測定時の光学条件は、7度入射、積分球受光（鏡面および拡散成分を含む）とした。

つぎに、赤外線ランプに対する、相対反射率は、次式で求めた。

$$\rho = \int \rho(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $E(\lambda)$ は、赤外線ランプの分光エネルギー分布である。今回使用した赤外線ランプのメーカー公表値を図2に示す。

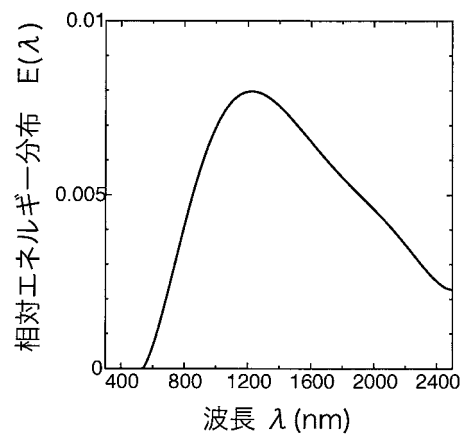


図2 赤外線ランプの分光エネルギー分布

2.4 絶対反射率の推定法

試料に熱線を照射した際の温度上昇から、絶対反射率を推定する。図1にしめすように、赤外線ランプから照射されたエネルギーを吸収することで、周辺より高温になった試料から、熱伝導、熱対流、熱放射によって、熱が放出される。定常状態では、これらの熱収支が釣り合っている。よって、 E ：照射熱量、 ρ_{abs} ：絶対反射率、 q_t ：伝導熱量、 q_c ：対流熱量、 q_r ：放射熱量として、次式が成り立つ。

$$E = \rho_{abs} E + q_t + q_c + q_r \quad (2)$$

(2)式の中で、 q_t 、 q_c 、 q_r は、2.2節の方法で測定する試料表面温度 θ_1 [℃]と周辺温度 θ_2 [℃]の温度差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ から求めることができる。よって、6種類の試料についての温度測定結果を(2)式に代入することで、未知数の照射熱量 E と絶対反射率 ρ_{abs} を、推定することができる。具体的な計算手順は以下の通りである。

手順1) q_i , q_c , q_r の導出

まず、試験試料裏面から断熱材への伝導熱量 q_i は、 $d=0.04$ [W/(m·K)] (文献値 [15])、断熱材の厚み $\delta=0.06$ [m] (実測値) として、 $q_i=(d/\delta) \Delta \theta=0.667 \Delta \theta$ である。

つぎに、自然対流熱量は、 $q_c=\alpha_c \Delta \theta$ から、対流熱伝達率 $\alpha_c=1.98 \Delta \theta^{0.25}$ (垂直壁表面 [15]) となる。

さいごに、放射熱量は、 $q_r=\alpha_r \Delta \theta$ から、放射熱伝達率 $\alpha_r=\epsilon_1 \epsilon_2 \cdot Cb \cdot \beta$ となる。ここで、 $\epsilon_2=0.95$ (容器内面は黒色塗装)、 $Cb=5.71$ 、 $\beta=1$ (室温) とし、各試料表面の放射率 ϵ_1 の値 (文献値) は、表2に示す。

手順2) q_i , q_c , q_r の計算

手順1で導出した各式に、2.2節で測定した試料表面温度 θ_1 、周辺温度 θ_2 を代入して、その数値をもとめる。

手順3) 照射熱量の推定

熱伝導、熱対流、熱放射によって、試料から放出される熱量 $q_i+q_c+q_r$ に見合う照射熱量 E を、2.3節の(1)式で求めた相対反射率 ρ_{rel} をつかって計算する。

手順4) 絶対反射率の推定

照射熱量 E は、本来、試料の種類に関係なく、一定値を示すものである。よって、手順3で算出した6つの試料に対する平均値を、真の照射熱量の推定値 E_m とし、試料ごとに、手順2で求めた全放出熱量 $q_i+q_c+q_r$ と E_m を(2)式に代入して、絶対反射率 ρ_{abs} を推定する。

3. 結果および考察

3.1 照射実験結果

各試料の温度測定結果を図3に示す。どの試料も、照射直後から温度上昇をはじめ。照射時間が10分を過ぎると安定しはじめ、その後は、温度上昇は緩やかになる。そこで、今回は、照射時間30分における測定値を、定常状態における温度 θ_1 、 θ_2 とした。その値を、表2に示す。

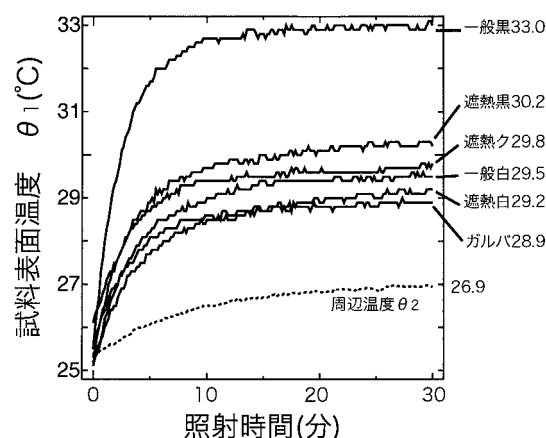


図3 試料表面温度の照射時間による変化
図中の数字は、照射時間30分における温度 (単位°C)。

3.2 分光反射率測定

相対分光反射率 $\rho(\lambda)$ の測定結果を、図4に示す。この値から、今回使用した赤外線ランプに対する試料表面の相対反射率を(1)式をつかって計算した。その結

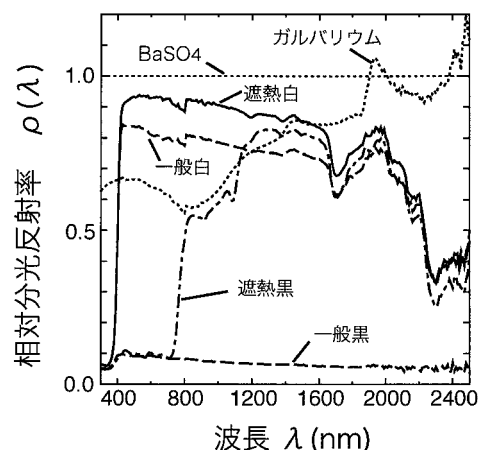


図4 相対分光反射率分布の測定値 (基準BaSO₄)

ガルバリウム鋼板の反射率が波長2000nm以上で一部1.0を超えているが、この図は、BaSO₄粉末面の反射率に対する相対値であり、絶対反射率が1.0を超えていることを示しているわけではない。

表2 照射時間30分における試料表面温度と赤外線ランプに対する相対反射率

試料	表面温度 *1 θ_1 (°C)	周辺温度 *1 θ_2 (°C)	温度差 $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ (°C)	相対反射率*2 ρ_{rel}	放射率*3 ϵ_1
遮熱白	29.2	26.9	2.3	0.80	0.90
遮熱クリーム	29.8	26.9	2.9	0.70	0.90
遮熱黒	30.2	26.9	3.3	0.66	0.90
一般白	29.5	26.9	2.6	0.71	0.90
一般黒	33.0	26.9	6.1	0.06	0.90
ガルバリウム	28.9	26.9	2.0	0.81	0.60

*1 赤外線ランプ照射30分後の実測値

*2 BaSO₄を基準とした、赤外線ランプに対する相対反射率

*3 文献値 (ASHRAE Handbook, 1997)

果を、表2の第5列にしめす。(ただし、遮熱塗料のクリーム色は、温度測定のみ行ったため、反射率は、推定値である。)

3.3 絶対反射率の推定

2.4節で詳述した手順に従って、絶対反射率を推定する。

手順1) 2.4節の通り。

手順2) 試料ごとに、温度差 $\Delta\theta$ の測定値を使って計算した q_t , q_c , q_r の値を、表3の第2列から4列に示す。

手順3) 放出熱量 $q_t+q_c+q_r$ と3.2節で求めた相対反射率 ρ_{rel} (表2の第5列)とから求めた照射熱量 E を、表4第4列に示す。

手順4) 平均照射熱量 $E_m=73.8[W/m^2]$ となる。この値と、放出熱量から推測される各試料の絶対反射率 ρ_{abs} を、表4第6列に示す。

推測された絶対反射率 ρ_{abs} を、分光光度計から求めた相対反射率 ρ_{rel} と比較すると(表4)、全般的には相違は小さく問題ないが、反射率の低い一般塗料の黒色($\rho_{abs}=0.29$, $\rho_{rel}=0.06$)では、0.2以上の違いがあり、相対反射率をそのまま絶対反射率として使用することには、問題があることが分かる。

3.4 高反射率塗料による遮熱効果

今回実験で使用した遮熱塗料とは、色調に無関係な近赤外域における反射率を高めた塗料である。日射には、ほぼ同じ熱量の可視光線と近赤外線とが含まれているが[14,15]、遮熱塗料は、さまざまな色調を選択しつつ、色調に無関係な近赤外線を高反射することで、日射からの受熱を軽減し、遮熱、断熱効果を発揮することができると言われている。

図4の相対分光反射率の測定結果をみると、白色については、一般塗料と遮熱塗料とで反射率には、0.1程度の違いしかないが、黒色については、色調に関する可視域(380~780nm)は、一致しているが、近赤外域(780~2500nm)では、一般塗料は反射率が0.1程度であるのに対して、遮熱塗料の方は、白色塗料と同じ0.7~0.8という高い反射率を示している。この反射率の違いは、照射実験において遮熱効果の違いとして顕著に現れている(図3)。一般塗料黒は、照射された熱をほとんど吸収するため、温度が急上昇している(照射30分で33.0℃)。これに対して、遮熱塗料黒は、同条件で30.2℃と約3℃も低く抑えられており、白色塗料と遜色ない遮熱効果を示している。ただし、これは、赤外線を多く含むランプに対する実験結果であり、実際の日射に対しては、遮熱効果は今回の実験よりは低下することが予想される。しかし、従来、高反射率塗料というと、白色または、淡色のみしか存在しなかったが[16]、遮熱塗料は、色調を自由に選択できることから、遮熱効果を発揮しつ

表3 試料表面温度から算出した放出熱量

試料	伝導熱量 $q_t [W/m^2]$	対流熱量 $q_c [W/m^2]$	放射熱量 $q_r [W/m^2 \cdot K]$	放出熱量 $q_t+q_c+q_r [W/m^2]$
遮熱白	1.533	5.61	11.15	18.3
遮熱クリーム	1.933	7.49	14.06	23.5
遮熱黒	2.200	8.81	16.00	27.0
一般白	1.733	6.54	12.60	20.9
一般黒	4.067	18.98	29.57	52.6
ガルバリウム	1.333	4.71	6.46	12.5

表4 放出熱量から推定した絶対反射率

試料	相対反射率*1 ρ_{rel}	放出熱量 $q_t+q_c+q_r [W/m^2]$	照射熱量 $E [W/m^2]$	平均照射熱量 $E_m [W/m^2]$	絶対反射率 ρ_{abs}
遮熱白	0.80	18.3	91.5	73.8	0.75
遮熱クリーム	0.70	23.5	78.3	73.8	0.68
遮熱黒	0.66	27.0	79.4	73.8	0.63
一般白	0.71	20.9	72.0	73.8	0.72
一般黒	0.06	52.6	56.0	73.8	0.29
ガルバリウム	0.81	12.5	65.8	73.8	0.83

*1 表2第5列より

*2 表3第5列より

つ、景観やデザインに配慮することができる。例えば、改修の際に、従来と同じ色調のまま遮熱効果を付与するといったことが可能である。遮熱塗料は、新しいタイプの高反射率塗料に位置づけられる。

以上、高反射率塗料による熱負荷軽減効果を実測により確認することができた。今後は、確立した高反射率塗料の評価技術（遮熱効果の測定、分光反射率の測定）にもとづき、高反射率塗料の反射指向性の測定を行い、都市建築物で高反射率塗料を使用した場合の周辺環境への影響の評価を行う予定である。

4. まとめ

本論文では、ヒートアイランド対策における地表面被覆の改善の1つとして有望視されている高反射率塗料の遮熱性能の測定を行った。その結果、得られた結論を要約する。

1) 定常状態における温度測定結果から、吸収熱量を算出し、照射熱源に対する絶対反射率を簡便に推定する方法を検討した。温度測定から推定された絶対反射率と、BaSO₄粉末を基準として分光光度計で測定した相対反射率とを比較した結果、反射率の低い塗料では、相対反射率をそのまま絶対反射率と見なして使用することには、問題があることが分かった。

2) 本推定法では、反射後の近赤外線を熱の移動として捉えることで、試料の近赤外線に対する反射指向性、つまり、建物が密集している都市環境で問題となる反射された熱線の行き先を、測定することができる。高反射率塗料による熱負荷軽減技術の評価手法として、有効である。

3) 照射実験と分光反射率測定から、遮熱塗料は、色調によらず、近赤外域の反射率が0.7～0.8と高く、照射熱を反射することで、遮熱効果を発現していることを確かめた。遮熱塗料は、近赤外線を選択的に反射する新しいタイプの高反射率塗料である。

謝辞

本研究は平成16年度大阪市立大学生活科学研究助成および平成17年度大阪市立大学特定研究奨励費により実施された。また、日本ペイント株式会社から試料を提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 尾島俊雄, ヒートアイランド, 東洋経済新報社, 2002。
- [2] 森山正和編, ヒートアイランドの対策と技術, 学芸出版, 2004
- [3] ヒートアイランド対策関係府省連絡会議, ヒートアイランド対策大綱, 2004年(平成16年)3月。
- [4] 大阪市, 大阪市ヒートアイランド対策推進計画, 2005年(平成17年)3月。
- [5] 近藤靖史, クールルーフ, 建築雑誌120, 1534 (2005.6) 60-61
- [6] 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子, 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の緩和に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集78 (2000) 17-25
- [7] 岡田朋和, 近藤靖史, 藤本哲夫, 高反射率塗料製品の日射反射性能に関する研究(その1) 各種高反射率塗料の分光反射率測定, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学II (2004) 359-360
- [8] 藤本哲夫, 近藤靖史, 岡田朋和, 高反射率塗料製品の日射反射性能に関する研究(その2) 入射角による日射反射率の差異に関する測定, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学II (2004) 359-360
- [9] 西村欣英, 松尾陽, 三木勝夫, 村瀬俊和, 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, 環境工学II (2003) 377-378
- [10] 西村欣英, 松尾陽, 三木勝夫, 村瀬俊和, 太陽熱高反射塗装の日射熱防除効果(その2), 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学II (2004) 357-358
- [11] 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 永田明寛, 建材の日射透過および反射性能における分光感度特性, 日本建築学会環境系論文集583 (2004) 15-21
- [12] 日本建築学会編, ヒートアイランド対策への学会提言に向けて, 2004年度日本建築学会地球環境部門研究協議会資料, 2004
- [13] 日本規格協会, JIS Z 8722:2000 色の測定方法-反射及び透過物体色
- [14] 日本規格協会, JIS R 3106:1988 板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法
- [15] 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄, 最新建築環境工学改訂2版, 井上書院, 1999.
- [16] 酒井英樹, 佐藤昌子, 色彩のもつ熱効果-色が赤外線反射特性に及ぼす影響-, 日本色彩学会誌26,S (2002) 52-53

都市環境に配慮した高反射率塗料による熱負荷軽減技術の開発・評価 —温度測定による塗面の絶対反射率の推定—

酒井 英樹, 永村 一雄, 土井 正

要旨：ヒートアイランド対策における地表面被覆の改善の1つとして有望視されている高反射率塗料の遮熱性能の評価方法を検討した。試料に近赤外線を照射した際の温度上昇から、熱の移動を計算することで、照射熱源に対する絶対反射率を推定した。本推定法によれば、反射後の近赤外線を熱の移動として捉えることで、試料の近赤外線に対する反射指向性、つまり、建物が密集している都市環境で問題となる反射された熱線の行き先を、簡便に測定することが可能となり、高反射率塗料による熱負荷軽減技術の評価手法として、有効である。

