

# 建築用仕上塗材の色彩と日射反射性能

## — 高反射率塗料の屋外曝露 1 年結果 —

### Colors and Solar Reflecting Performance of Wall Coatings of Buildings

#### - High-Reflectance Coatings After One Year of Outdoor Exposure -

中村裕介\* 茂木正史\* 小河義郎\*

#### 要 旨

日射量の多い夏季の遮熱対策として工場などの金属屋根建物では高反射率塗料の採用が増えている。その有効性を確認するために複数メーカーの製品について屋外曝露を行い、日射反射率を計測した。その結果、高反射率塗料製品は同色の普通塗料と比較すると赤外線領域の高反射特性により暗色であるほど遮熱効果が増すが、明色であるほど屋外曝露の汚れによる可視光線領域の反射率が大きく低下することで遮熱性能が低くなることが分かった。また日射反射率と遮熱性能および色の明度との関係を明確にしたことで、屋根や壁の配色についてデザインと遮熱性能を考慮した設計、改善提案が可能となった。

キーワード：高反射率塗料、日射反射率、明度、屋外曝露

#### 1. まえがき

近年の省エネルギー施策に伴い、住宅分野の断熱基準が強化されたが、太陽光を直接受ける建物最外皮の外壁や屋根で日射を反射させて侵入熱エネルギーを減少させる「はじめから建物に日射熱を入れない」手法は、より効果的な夏季の遮熱対策として注目されている。特に工場や冷倉庫、畜舎などの定期的に空調機器を使用する建物では、冷房負荷エネルギーの抑制や壁・天井からの輻射熱低減による室内温熱環境の改善、および外気温変化による金属の膨張収縮で発生する音鳴り防止などの目的で、金属折板屋根や壁の仕上げに高反射率塗料を用いるようになった。

しかしながら製品の性能規格に関する明確な基準はなく、地球温暖化およびヒートアイランド対策の一環として平成 17 年度より東京都クールーフ推進事業が 3 年間実施されたが、そこでは遮熱性能の指標となる日射反射率が 50%以上という製品を採用したに過ぎない。建物への適用には製品の特性として、初期性能だけでなく経年劣化も確認する必要がある。また建物外装材の配色はデザインの基本であるため、色彩や明度と遮熱性能の関係を明確にすることで、はじめて有効な資料とすることができる。

本報では高反射率塗料製品による遮熱対策の有効性を確認するために実施した屋外曝露試験の結果および色彩と遮熱性能の関係について報告する。

#### 2. 高反射率塗料の遮熱原理

##### 2.1 太陽光の熱エネルギー

太陽光は図-1に示すとおり、波長の短い順に殺菌・退色作用のある紫外線、光として感じる可視光線および熱線とも呼ばれる赤外線から構成される、輻射による熱エネルギーである。図-2に太陽光の各領域における熱エネルギー割合を表す。遮熱対策には可視光線領域だけでなく、赤外線領域も重要になることが分かる。

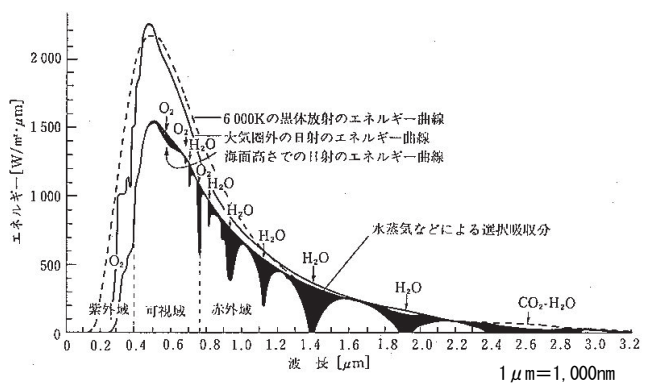


図-1 太陽放射の分光分布<sup>1)</sup>

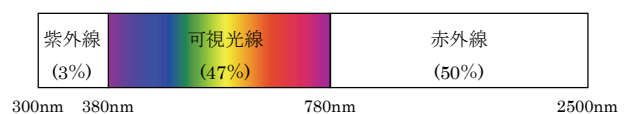


図-2 太陽光の熱エネルギー割合

\*技術研究所

## 2.2 伝熱3要素

### a. 伝導

物体表裏の温度差により高温部から低温部へ熱が移動すること。熱の伝わり易さは材質によって異なり、熱伝導率 $\lambda$ で表される。ウレタンフォームなどの断熱材はこの性能を表示している。

### b. 対流

流体である空気が移動することによって熱を伝えること。密閉空間でも温度上昇にともなう浮力が生じる。断熱材は空気の動きを妨げる役割をしているに過ぎない。

### c. 輻射

物体から放射している電磁波（赤外線）のこと。アスファルト舗装や金属屋根・外壁、投光ランプのそばで感じる熱の正体であり、太陽光に代表されるように真空中でも熱を伝えることができる。なお対流と輻射の合計を熱伝達率と呼び、熱貫流率の計算では対象部位ごとの実用値を用いる場合が多い。

## 2.3 高反射率塗料の遮熱原理

同色の普通塗料に比べてより多くの太陽光の輻射エネルギーを反射させる特性を持つ“高反射率”塗料は、その効果から“遮熱”塗料とも呼ばれている。その他に“断熱”塗料という呼称もあるが、前節および図-3に示す熱の伝わる3要素である伝導、対流、輻射を考慮すると相応しくない。

高反射率塗料には図-4に示す塗膜断面のように、セラミック系の顔料等によって赤外線領域の熱エネルギーを反射させるタイプと中空パールなどを配合することで密閉空気層を取り入れた断熱タイプ、これらの複合タイプがある。ただし密閉空気層による断熱といっても、最大1mm程度の塗膜厚さの中に、ウレタンフォーム20mmなどと同等の断熱性能を有していないことは容易に想像できる。高反射率塗料の主な遮熱特性は赤外線反射によるものであり、ウレタンフォームなどの断熱材と根本的に異なる遮熱原理になるため、日射の当たらない壁内部に、さらに空気層を設けずに適用することは避けるべきである。なお塗膜表面での可視光線領域の反射は色彩で決定するものなので、普通の塗料でも生じる現象である。

## 3. 性能確認試験

### 3.1 試験体

選定した製品は市販の高反射率塗料 17 メーカー21 製品の無彩色白色 16 種類、灰色 20 種類、黒色 13 種類、有彩色 8 種類および比較用の普通塗料である。試験体はこれらの製品を溶融亜鉛めっき鋼板 300×300×1mm に標準仕様で塗布して製作したものである。屋外曝露は平成 18 年 9 月から、つくば市にある技術研究所敷地内で最低地上高 500mm、2.5/10 勾配、南向きに設置して行っ

た。屋外曝露状況を写真-1に示す。1年曝露試験体は屋外曝露を行っているものから50×50mmの試験片を切り出したものである。計測前洗浄は行っていない。

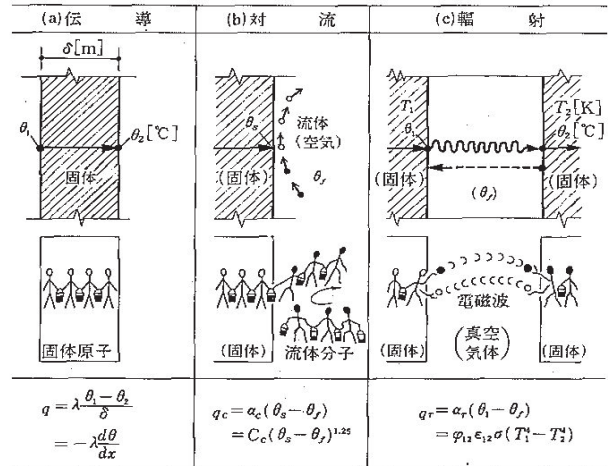


図-3 熱移動の基本3プロセス<sup>1)</sup>

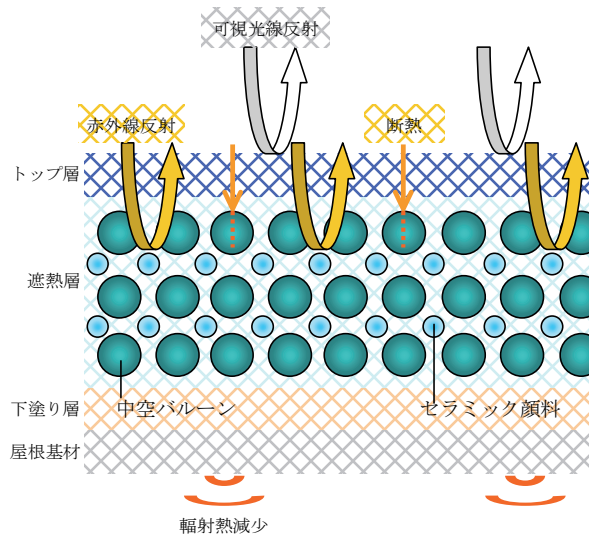


図-4 高反射率塗料の塗膜断面構成



写真-1 H18.9~屋外曝露状況

### 3.2 測定概要

遮熱性能を表す日射反射率は JIS R 3106<sup>2)</sup>に従い、分光測光器により波長範囲 300~2500nm の分光反射率を計測し、波長ごとの日射強度の重係数を用いて算出した。分光反射率の測定は財団法人建材試験センターに依頼した。測定に用いた分光測光器は写真-2 に示す島津製作所製の分光光度計 UV-3150 に積分球 ISR-3100 を取り付けたものである。色の明度は JIS Z 8721<sup>3)</sup>から求めた。

また屋外曝露を行っている試験体の温度計測と外気温・日射量の計測を図-5 に示すとおり行った。



写真-2 分光測光器

## 4. 試験結果

### 4.1 試験体温度

屋外曝露を行っている試験体の温度は、建物における相当外気温となる。相当外気温とは屋根や外壁に日射が当たる場合、日射の強さに応じて外気温が仮想的に上昇したと考える温度のことで、建物に入力される実際の熱エネルギーとなる。

夏季の天候の良い日を選んで実測した全試験体の温度、外気温および日射量を図-6 に示す。同様に夏季の曇った日の結果を図-7 に示す。前者では色彩を問わなければ試験体温度で最大 41.9℃の差が生じ、外気温よりも最大 51.6℃高くなった。後者では試験体温度の最大差 6.9℃、外気温との最大差 7.4℃であり、日射の強さによって試験体の温度差に大きな変化をもたらす。

次に製品の優劣を確認するため、上記の結果を無彩色黒、灰、白に分類したものを図-8 と図-9 に示す。日射量が多い日でも、明度の高い白色では明度の低い色よりも試験体の温度差が少なくなる。色別の最大温度差は灰色の 21.1℃であった。反対に日射量が少なければ色彩に関わらず、各製品の優劣はほとんど見られなかった。なお高反射率塗料でも普通塗料と温度差のなかったものがあつたため、表-1 にまとめる試験体の最大温度差の結果は、そのまま高反射率塗料製品の性能差と見ることができる。

高反射率塗料の最大の特徴である赤外線領域の高反射特性は前述した通りだが、以上の温度実測結果からも日射量が多いほど遮熱効果は大きくなるため、高反射率塗料は日射があつてこそその技術であることが分かる。これは日射量の多い夏季の遮熱効果は大きく、日射量の少ない冬季では日射反射による熱取得損失が少ないことを示唆している。

表-1 曝露試験体の最大温度差

	黒	灰	白	有彩色含む 全試験体
日射量大 (図-6, 図-8)	17.6	21.1	10.0	41.9
日射量小 (図-7, 図-9)	3.3	3.0	2.4	6.9

単位(℃)

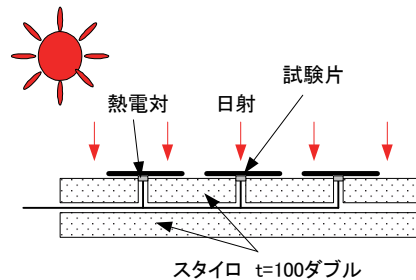


図-5 屋外曝露試験体の温度計測概要

H18.9.5 気象条件

最大日射量 712W/m<sup>2</sup>、その時の外気温 28.7℃

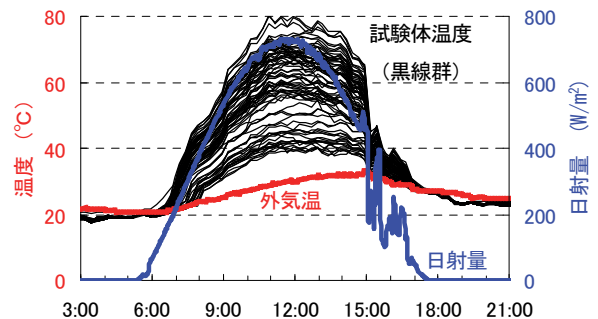


図-6 曝露試験体温度実測結果 (日射量大)

H18.9.1 気象条件

最大日射量 155W/m<sup>2</sup>、その時の外気温 23.5℃

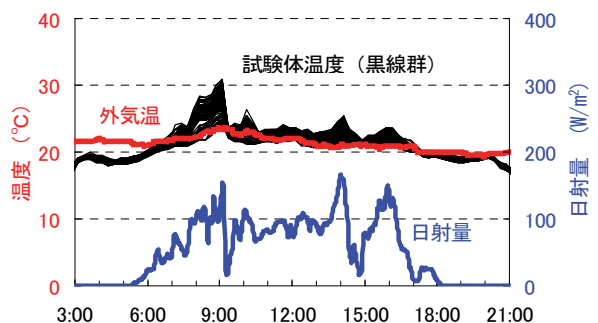


図-7 曝露試験体温度実測結果 (日射量小)



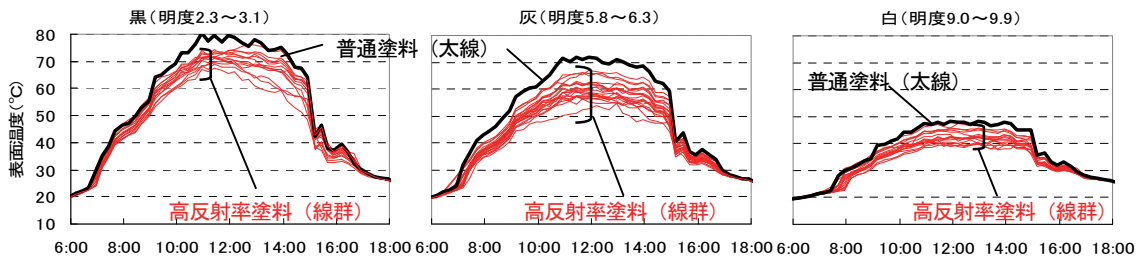


図-8 色別の温度実測結果 (日射量大)

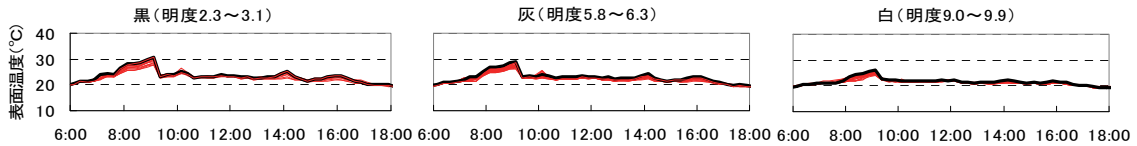


図-9 色別の温度実測結果 (日射量小)

## 4.2 日射反射率

### a. 普通塗料との比較

普通塗料と典型的な反射特性をもつ高反射率塗料の反射特性を図-10に示す。この反射特性に JIS R 3106 に規定する重係数を乗じて加重平均したものが日射反射率となる。普通塗料灰 (明度 6.0) の日射反射率は 24% だが赤外線領域の高反射特性を持つ同色の高反射率塗料では 59% であった。日射量の多い日では約 20℃ の温度差となる。ただし普通塗料白 (明度 9.8) の日射反射率は 87% であるため、色の明度も重要となる。

### b. 屋外曝露による性能変化

屋外曝露による反射率の低下は田坂ら<sup>4)</sup>により報告されており、今回の計測結果でも曝露環境が異なるものの、同様の結果となった。図-11に示す普通塗料の測定結果から、表面汚れによる可視光線領域の反射率低下は明度の高い色ほど大きいことが分かる。また図-12の高反射率塗料でも可視光線領域は同様の傾向を示すが、赤外線領域の低下は色に関わらず一様であった。屋外曝露による高反射率塗料の性能劣化は、汚れによる可視光線領域の低下と塗膜劣化による赤外線領域の低下が合算されるため、普通塗料よりも大きいと考えられる。

図-13に初期と曝露1年後の可視光反射率と日射反射率を色別に示す。日射反射率の変化が最も大きい白色 (明度 9.6~9.9) で、平均 15%、最大 31% 低下した。1年曝露後では可視光反射率の低下が大きく、普通塗料よりも低い日射反射率の高反射率塗料が 10 種類中 7 種類となった。その他の色の日射反射率の平均低下率は白 (明度 9.0~9.2) 13%、灰 (明度 5.8~6.3) 8%、黒 (明度 2.3~3.1) 3% となった。同様に可視光反射率の平均低下率は白 16%、灰 5%、黒 5% となり、明度が低くなるにつれて赤外領域の反射率の低下がクローズアップされることがわかる。

一般に屋根は明度の低い色が採用されるため、高反射率塗料による遮熱効果を期待できるが、一部製品では1年曝露の性能劣化により、普通塗料のほうが反射率の高いものもある。経年変化を考慮した選定が必要である。

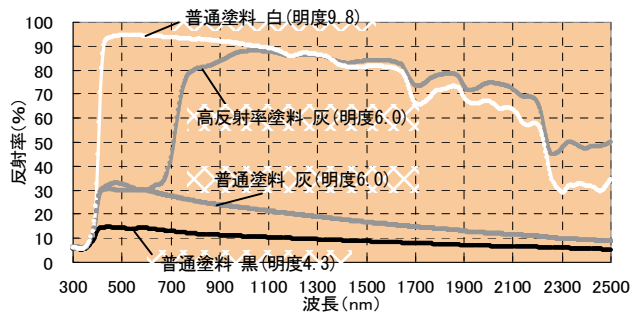


図-10 普通塗料と高反射率塗料の反射率比較

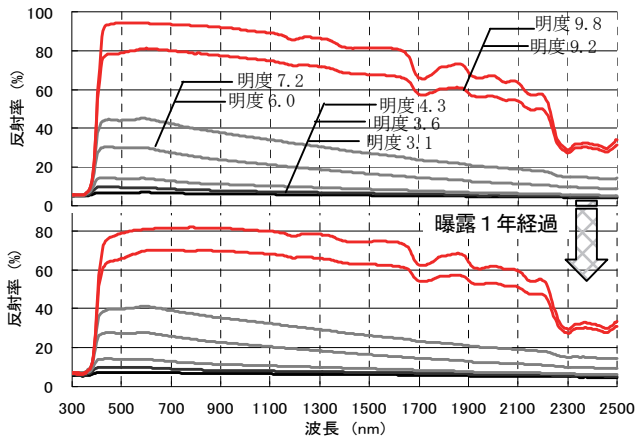


図-11 屋外曝露による反射率変化 (普通塗料無彩色)

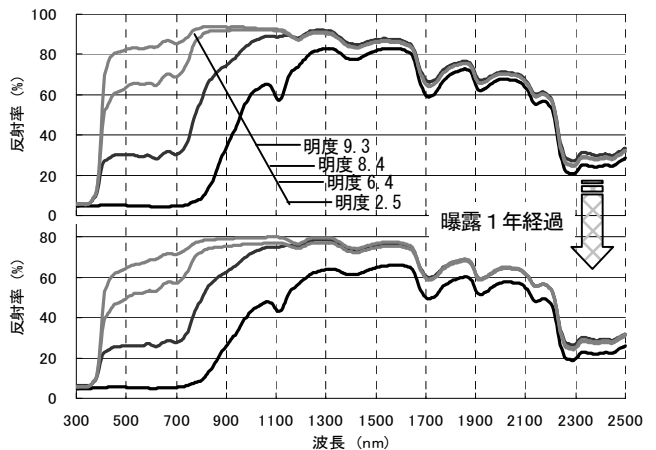


図-12 屋外曝露による反射率変化 (高反射率塗料無彩色)

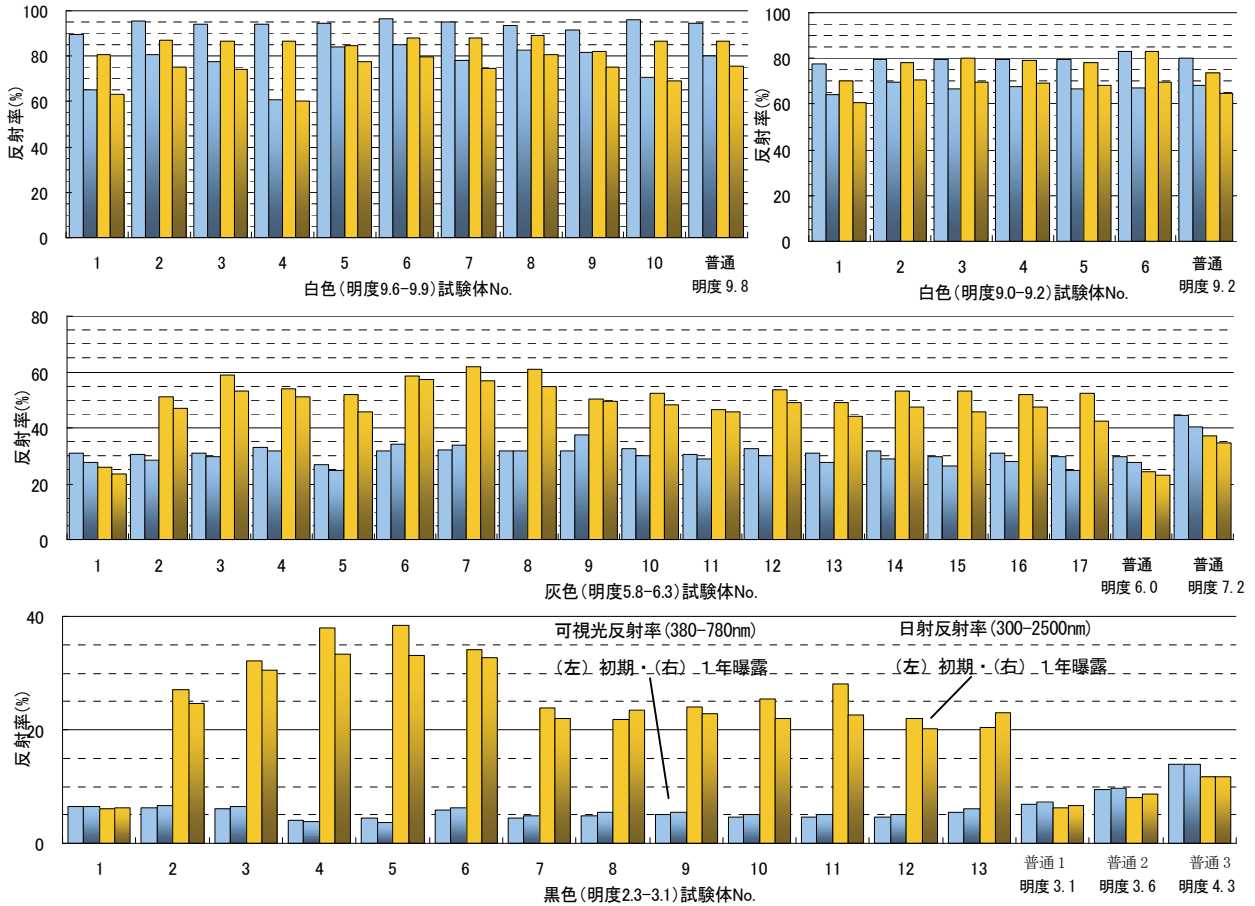


図-13 色別の日射反射率算出結果

5. 色彩からの遮熱性能予測

建築分野で一般に知られる色の表示方法であるマンセル表色系の明度は可視光線領域の反射特性を表すものである。太陽光全域における反射特性は日射反射率と定義されており、遮熱性能を検討する際に用いる反射率がどちらであるか確認する必要がある。一般に同色では普通塗料よりも高反射率塗料のほうが遮熱性能に優れるが、明度が異なればその効果量も変わる。普通塗料の色の持つ反射特性を把握することで適切な選定ができるようになる。ここでは屋根・壁の配色を遮熱性能からも検討できるように、明度と日射反射率の関係を整理する。式(1)に相当外気温の算出方法を示す。

$$t_i - t_o = \frac{a_i \cdot J}{a_i} \quad (1)$$

ここに、

$t_i$  : 相当外気温(°C)

$t_o$  : 外気温(°C)

$a_i$  : 試験体日射吸収率

$J$  : 日射量(W/m<sup>2</sup>)

$a_i$  : 試験体総合熱伝達率(W/m<sup>2</sup>・K)

図-14 に無彩色の明度と日射反射率および式(1)から算出した相当外気温の関係を示す。相当外気温の算出は実測条件と合わせた。その結果、日射反射率 10% は夏季で 5~7°C の効果を持つことが分かった。また冬季では 1~3°C となることが分かった。

しかしながら有彩色では図-15 に示すように実測値と差異を生じるものもあった。有彩色は彩度、色相が遮熱性能にどのように関与するのか不明であったため、同明度・同彩度の普通塗料有彩色の日射反射率を計測した。その一例を図-16 に示すが、同明度でも反射率に 10%

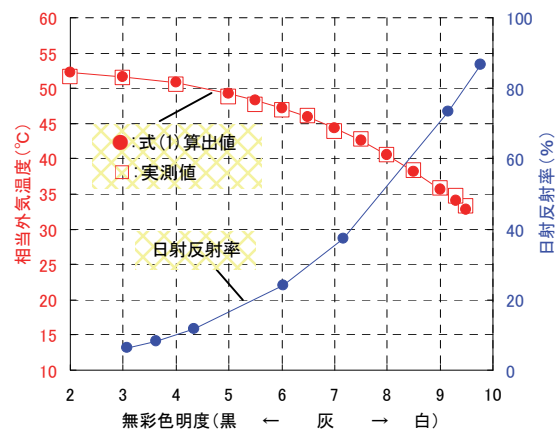


図-14 明度と日射反射率および予測温度の関係

程度の差があることが分かった。原色に用いる塗料配合によって反射率が決定するものと考えられるが、全ての色について日射反射率を計測することは実質的に不可能なため、写真-3に示す財団法人日本塗料工業会の発行する色見本帳を用いて日照下の表面温度から求めたみかけの日射反射率と実際に分光測光器で計測した結果が同等であることを確認した。以上により有彩色の温度予測も可能となった。

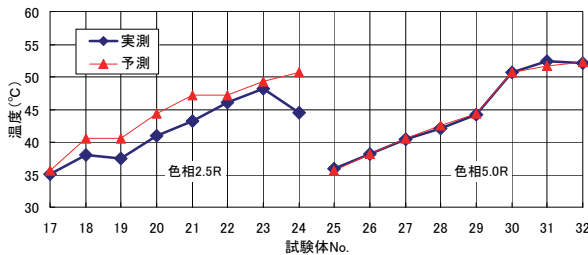


図-15 日射反射率を用いた温度予測と実測 (有彩色)

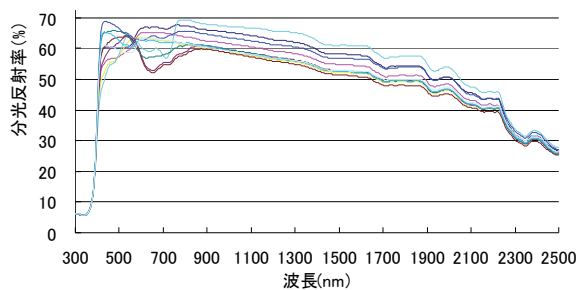


図-16 同明度・同彩度一般塗料有彩色の反射率



写真-3 色見本帳による遮熱性能測定

## 6. CO<sub>2</sub>削減量の算定

高反射率塗料によるCO<sub>2</sub>削減量の算定方法を表-2に示す。東京都クールーフ協議会の導入実績(コンクリート系 6675.7m<sup>2</sup>、金属系 3517m<sup>2</sup>)<sup>5)</sup>から算定すると、13.1tのCO<sub>2</sub>削減量となった。算定条件は冷房消費エネルギー量 30.9kWh/m<sup>2</sup>、暖房消費エネルギー量 16.4kWh/m<sup>2</sup>、対策面積割合は100%と設定した。

表-2 高反射率塗料による熱負荷低減割合の算出

屋根仕様	設定温度の緩和	空調エネルギー削減割合(%)		算出式
		夏季	冬季	
コンクリート系	夏期+1°C、冬期+0.5°C (夏期: 27°C→28°C) (冬期: 20°C→20.5°C)	-8.8	4.8	(冷房消費エネルギー量kWh×8.8%+暖房消費エネルギー量kWh×(-4.8%))×対策面積割合×0.555kgCO <sub>2</sub> /kWh
金属系	夏期+2°C、冬期+1°C (夏期: 26°C→28°C) (冬期: 20°C→21°C)	-15	9.7	(冷房消費エネルギー量kWh×15%+暖房消費エネルギー量kWh×(-9.7%))×対策面積割合×0.555kgCO <sub>2</sub> /kWh

## 7. まとめ

高反射率塗料の遮熱効果の有効性を確認するため、屋外曝露を行って特性の変化を計測した。以下に得られた知見などを示す。

- i. 高反射率塗料の遮熱効果は日射量によって大きく変化する
- ii. 明るい色ほど屋外曝露による性能劣化は大きい
- iii. 明度と日射反射率の関係を導き、建物入射エネルギーとなる外装塗料の表面温度を予測できるようになった
- iv. 予測に必要な物性値となる塗料の日射反射率は明度と同意の可視光線領域だけでなく、赤外線領域まで含む必要である

## 8. あとがき

夏季の暑さが厳しい地域では、断熱性能を増すよりも屋根通気層の通気量増加や放射の遮蔽などの日射遮蔽対策を取り入れることが重要となる。夏季に定期的に空調機器を使用する部屋直上上の屋上や屋根に高反射率塗料を施工して強い日射熱をカットすることで、冷房負荷エネルギーを減らし、さらに空調機器だけで下げることの難しい天井や外壁の表面温度を低下させて居住者に与える快適性を向上させることができる。

以上のように、夏季の省エネルギー技術として注目される高反射率塗料だが、建築物への適用には適切な選定が必要である。

### [参考文献]

- 1) 田中俊六、「最新建築環境工学改訂3版」、井上書院、pp. 33-72、2006.3
- 2) JIS R 3106「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」、1998
- 3) JIS Z 8721「色の表示方法—三属性による表示」、1993
- 4) 田坂太一、藤本哲夫、岡田朋和、近藤靖史、「高反射率塗料製品の日射反射性能に関する研究(その3) 屋外曝露試験による日射反射性能の長期変化の測定」、日本建築学会大会学術講演梗概集、p. 667、2006
- 5) クールーフ推進協議会、「平成18年度報告書」、pp. 27-29、2007.3