

一般財団法人 日本塗料検査協会

東支部検査部 清水 亮 作

1. はじめに

早いもので、前回の JIS K 5675「屋根用高日射反射率塗料」と米国「Cool roof paint」の評価手法に関するご紹介から1年が経過してしまいました。この間、我が国の「高反射率塗料」を取り巻く環境においても様々な展開がなされました。特に、太陽光スペクトルの反射性能だけに頼らない、プラス α の性能を付加したり、あるいは反射とは全く異なる別の技術を導入したりした塗料製品も種々販売されており大変興味深いところです。

以前から、反射とは異なる技術をアピールしている塗料製品も有りましたが、これらは、その基本となる技術の説明が曖昧であったり、デタラメであったりして、まともにお付き合いのできる代物ではありませんでした。しかしながら、近年、普及してきている反射とは異なる技術を用いた塗料製品の技術的原理については、科学的に正しい解釈をしている物もあります。特に、「放射性能」をアピールしている塗料製品がありますが、これの科学的根拠は自明の事です。例えば、前回紹介しました、米国の「Cool roof paint」では反射性能と放射性能を同時に評価していますし、我々が普及に努めている「高反射率塗料」においても放射性能は併せ持っています。一方、市場には未だに魔法の技術をアピールした製品も出まわっているようですし、また、技術的根拠は正しくても、その効果は希薄で限定的と考えられる要因を主の性能としてアピールしている物もあります。

ここで、一度、原点に立ち返ってみることにします。例えば、「高反射率塗料」を広く普及させたい目的は何でしょうか？単に「塗料の日射反射率を高くしたい」ためではありません（これは、目的に対する手段ですよ）。言うまでもなく、建築物等への太陽日射による蓄熱を抑え、冷房負荷を抑制したり、都市全体への蓄熱（ヒートアイランド現象）を抑制したりする、いわゆる“省エネルギー”に貢献する塗料製品を普及させることです。そして、「高反射率塗料」以外の技術を用いる塗料製品においても、この目的は概ね同じことでしょう。

そこで、技術的な原理は異なっても、同じ目的である省エネルギーに貢献する塗料製品をまとめて“省エネ塗料”と呼ぶ言い方が経済産業省より発信されました。先に普及した「省エネ家電」との呼び方になぞらえたそうです。この事は、（社）日本塗料工業会においても賛

同しており、塗料製品が採用している技術の原理そのものを評価する方法ではなく、“省エネルギー”という目的そのものを評価する方法を研究・開発しているところです。日塗検も、この事業に参画し公平・公正な立場で“省エネ塗料”の効果を一元的に評価できる試験方法を研究することとなりました。

今回は、“省エネ塗料”について少し詳しく説明するとともに、評価手法の研究について、その新たなアイデアを簡単にご紹介いたします。

2. “省エネ塗料”とは

2.1 “省エネ塗料”の技術（手段）

(1)高反射率タイプ

この塗料については、今更、詳しく説明するまでも無いでしょう。一言で述べると、太陽から照射される光エネルギーを反射させることにより、熱エネルギーに変換させない原理によります。ただし、可視光線領域（概ね380～780nm）の光エネルギーはエンドユーザーの希望による色を実現させるため、その色に応じた吸収を持つ特別に設計された塗料です。可視光線領域以外の波長域（概ね780～2500nm）の光エネルギーを如何に多く反射できるかを追求することで日中の強い日射を極力受けない技術になります。

(2)高放射率タイプ

絶対零度（-273.15℃）より高い温度にある全ての物質は、光エネルギーを放射しています。従って、放射した光エネルギーが戻ってこなければ、その物質の温度は原理的に絶対零度まで低下するはずですが、実際には周囲の空気（気温）からの伝熱や周囲の物体からの放射エネルギーを吸収するため、概ね周囲の気温以下に下がることはありません。ただし、この事は、建築物等を外気温と同等の温度に保つと共に「建築物等の温度が放射で低下する→外気温が建築物等に伝熱→・・・」を無限に繰り返す事になるため、外気温を次第に低下させる効果も期待できます。雲の無い冬の夜に言われる「放射冷却」と同じ現象です。このタイプの塗料製品は、ヒートアイランド現象や熱帯夜の解消に期待できる技術になります。

では、この放射でどの程度の効果が期待できるのでしょうか？机上で簡単な理論計算を試みてみました。放

射エネルギーは、次に示す式1で求めることができます。

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \dots (式1)$$

ただし、

I : 放射エネルギー (W/m²)

ε : 対象物質の放射率 (0~1の値)

σ : ステファン・ボルツマン定数

(=5.67 × 10⁻⁸ W · m⁻² · K⁻⁴)

T : 温度 (K)

今、温度が35℃で放射率が0.87(一般的な塗膜)の塗装屋根を仮定し、ここから放射されている放射エネルギーを算出すると、

$$I = 0.87 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (35+273.15)^4 = 445 (W/m^2) \dots (式2)$$

と求められます。日本における真夏の炎天下、雲一つない晴天時の太陽日射が概ね1000 (W/m²) ですから、445 (W/m²) という放射量は相当大きなエネルギーと言えます。同条件 (1000 (W/m²)) 時の反射率で言えば、44.5%に相当します。

ここで、前回 (米国 Cool roof paint の評価手法である SRI (Solar Reflectance Index) 値の考え方) のおさらいをしておきましょう。SRI 値は、ある塗膜が1000 (W/m²) の日射を受けた場合、その表面温度が何℃になるかをその塗膜の反射率と放射率から算出し、この温度が一般的な黒色塗膜の場合を0、白色塗膜の場合を

100とした場合に、どの位置関係にあるかを示した指標でした。そこで、いろいろな反射率と放射率を持つ塗膜の表面温度と SRI 値を机上で算出してみました (表1)。表1より、反射率と放射率の双方がどの程度の効果に寄与するのか、おおよそイメージできるかと思います。

例えば、日射反射率が30%、放射率が0.85の塗膜に1000 (W/m²) の日射を照射すると、その塗膜の表面温度は71.2℃に上昇します。今、この塗膜の放射率を0.1上げて0.95にした場合、表面温度は69.6℃になり、71.2-69.6=1.6℃の温度上昇が抑制されます。一方、この塗膜の日射反射率を10%上げて40%にした場合、表面温度上昇は66.2℃になり、71.2-66.2=5.0℃の温度上昇が抑制されます。すなわち、放射率は、日射反射率が低い領域では温度上昇の抑制に対して比較的大きく寄与しますが、日射反射率が高い領域ではそれほど顕著な寄与は認められません。

表1を見ると、日射反射率の劇的な向上が困難な濃色系の塗膜では、放射率を向上させる策が有用と考えられます。しかしながら、多くの有機塗膜の放射率は色の濃淡にかかわらず、概ね0.9程度の値を持っています。この放射率を最大限 (理論値1.0) まで向上させたところで、その寄与はあまり期待できないのかもしれない。

(3)断熱タイプ

“断熱”と言うと、我々の生活の中で比較的イメージしやすい言葉ですが、その物理的な意味は非常に難解で量子物理学から攻略していかなければ正しく理解するこ

表1 放射率と日射反射率が塗膜表面温度及び SRI 値に及ぼす関係 (入力日射量 : 1000(W/ m²))

計算値	放射率	日射反射率 (%)							
		30	40	50	60	70	80	90	100
塗膜 温度 (℃)	0.10	90.7	83.1	75.4	67.6	59.9	52.1	44.2	36.3
	0.30	83.7	77.0	70.3	63.5	56.6	49.6	42.6	35.5
	0.50	78.3	72.3	66.3	60.2	53.9	47.6	41.2	34.8
	0.70	74.0	68.6	63.1	57.5	51.8	46.0	40.1	34.1
	0.80	72.1	66.9	61.6	56.3	50.8	45.3	39.6	33.9
	0.85	71.2	66.2	61.0	55.7	50.4	44.9	39.4	33.8
	0.90	70.4	65.4	60.4	55.2	50.0	44.6	39.2	33.6
	0.95	69.6	64.7	59.7	54.7	49.5	44.3	39.0	33.5
	1.00	68.8	64.0	59.2	54.2	49.1	44.0	38.7	33.4
SRI 値	0.10	-21.8	-1.6	18.7	39.2	59.7	80.3	101.0	121.8
	0.30	-3.2	14.4	32.2	50.2	68.4	86.8	105.4	124.1
	0.50	11.0	26.8	42.7	58.9	75.3	92.0	108.9	126.0
	0.70	22.5	36.7	51.3	66.0	81.1	96.3	111.9	127.6
	0.80	27.4	41.1	55.0	69.2	83.6	98.2	113.2	128.3
	0.85	29.7	43.1	56.7	70.6	84.8	99.1	113.8	128.7
	0.90	31.9	45.0	58.4	72.0	85.9	100.0	114.4	129.0
	0.95	34.0	46.9	60.0	73.4	87.0	100.8	114.9	129.3
	1.00	36.0	48.7	61.5	74.7	88.0	101.6	115.5	129.6

とは出来ないでしょう。ここでは、主に建築分野で“断熱材”として用いられる建材（塗料）に限ります。

“断熱材”を理化学辞典（岩波理化学辞典第5版）で引くと、「熱を伝えにくく、温度差を維持するために使われる材料」とあります。ここで、重要なキーワード「温度差を維持」が挙げられます。逆に考えると、必要な時間、温度差を維持できない材料は“断熱材”とは呼べないと言えます。このタイプの塗料は、特別に設計した顔料や中空バルーン等を塗膜中に加え、塗膜の熱伝導率を極めて小さくする技術が用いられています。

ところで、建築分野では、断熱材の性能を示す指標として熱伝導率や熱貫流率といった値が良く用いられています。時折ですが当協会にも質問があり、時に誤った理解をしている場合もありましたので、ここでもう一度、おさらいをしておきましょう。熱伝導率とは、「厚さ1 mの物体の両端に1 K（1℃）の温度差がある場合、その物体の1 m²の面積から1秒間に流れる熱量」を示したものです。なんだか複雑ですね。式を含めながら眺めた方がわかり易いかもしれません。

「厚さ1 mの物体の両端に1 K（1℃）の温度差がある」とは温度勾配の事であり、両端の温度差が大きい程、そしてその間の距離（長さ）が短いほど、この値は大きくなります。式で書くと、温度差÷距離（長さ）で示されます（式3）。

$$\text{温度勾配} = \frac{\text{両端の温度差}}{\text{長さ}} = \frac{\Delta T_{(^\circ\text{C})}}{L_{(m)}} \quad \dots \text{(式3)}$$

次に、「その物体の1 m²の面積から1秒間に流れる熱量」の表現と合わせると、面積が広ければ広いほど、そして温度勾配が大きければ大きいほど、より多くの熱量が流れる事を示しています。式で書くと、温度勾配と面積の掛け算になります（式4）。

$$\text{熱量}(Q_{(W)}) = \text{面積} \times \text{温度勾配} = A_{(m^2)} \times \frac{\Delta T_{(^\circ\text{C})}}{L_{(m)}} \times k \quad \dots \text{(式4)}$$

ただし、 k は比例定数

ここで、比例定数 k が本命の「熱伝導率」になります。では、この k の単位を考えてみましょう。式4を変形して k を導くと、

$$k = \frac{L_{(m)} \times Q_{(W)}}{A_{(m^2)} \times \Delta T_{(^\circ\text{C})}} \quad \dots \text{(式5)}$$

ここで、単位だけを記述すると、 $k = \frac{m \times W}{m^2 \times ^\circ\text{C}}$ となります。これが熱伝導率の単位ですが、次元に長さ（m）

と面積（m²）が含まれている点に注目しましょう。一般

に熱伝導率の単位は、 $\frac{m}{m^2} = \frac{1}{m}$ の演算を済ませた後の

「W/（m・℃）又はW/（m・K）」が用いられますが、決して「単位長さ当たり」という意味ではありません。そのココロは、「流れる熱量＝面積×温度勾配」なのです。

更に、熱伝導率は比例定数（ k ）であることも忘れてはなりません。ここに、実際に目の前にある物の「厚さ」に関する情報は入っていません。例えるなら、「水の沸点」と同じイメージでしょうか。コップ1杯の水の沸点は100℃、プールいっぱいの水の沸点もやはり100℃です。厚さ100 μmの塗膜も、それを10回塗り重ねた厚さ1000 μmの塗膜も熱伝導率は同じです。

一方、同じ塗料でも膜厚100 μmと1000 μmでは熱の伝わり方が異なるのは自明の事です。この違いを表すのが前述した「熱貫流率(W/(m²・K))」になり、熱伝導率(W/(m・K))を膜厚(m)で割った値です。「断熱性」をアピールしている塗膜の中には、熱伝導率が建築材料で使われる発砲ポリスチレンフォーム等の断熱材と同程度のものも実在しています。しかし、断熱材と同じ厚さで使わない限り、同等の断熱性能が出ないことは言うまでもありません。

なお、「断熱塗料」と称している塗料製品の中には、ボイラー配管等に非常に厚く（膜厚1 cm以上）塗り、表面に伝達した熱は放射で逃がすメカニズムのものや、断熱材としてではなく急激な温度変化を緩和する目的のものも存在しますが、ここでは建築用の断熱材を対象にします。

(4)その他のタイプ

当協会では、まだ十分に把握できていませんが、上記以外にも物質の相転移（中空では無く、適度な温度で相転移をする物質を封入したバルーンを塗膜に混入させる）を活用した技術等があるようです。また、実際には既知の物理現象（反射や放射）を用いているにもかかわらず、滅茶苦茶な技術論をアピールして他の技術と差別化している「魔法のタイプ」も、この「その他のタイプ」に含めておきましょう（この様なタイプも一元的に評価可能な試験方法を目指すとの意味）。

2.2 “省エネ塗料”の評価について

ここまで、高反射タイプ、高放射タイプ、断熱タイプと3タイプの省エネ塗料を挙げてみました。それぞれのタイプでアピールしている基本技術やその原理は異なりますが、どのタイプもそれぞれの原理が相まっていることも事実です。例えば、高反射タイプであっても必ず放射率は有りますし、わずかであっても熱伝導率に応じ

た熱抵抗を示します。もちろん、高放射タイプであっても日射を反射し熱抵抗も示します。そこで、これらの異なる技術原理をいっぺんにまとめて評価する方法について考えてみます。

(1)熱流を観察する方法

温度差があれば、熱は、その間に必ず流れます（逆に熱が流れれば、そこには温度差ができる）。この熱の流れを測定できるセンサーがあり（図1）、これを試験板の裏面に貼り付けて表面と裏面とに温度差を与えたり、試験板表面から日射を与えたりすると、塗膜を通過する熱の流れを定量的に把握することが可能になります。

そこで、日塗検では、現在、このセンサーの活用方法を模索しているところです。



図1 熱流センサー（江藤電気㈱ M55A）

(2)熱流センサーで捉えられる知見

図2は、アルミ板に以下の塗料をそれぞれ塗って、試験板の両面にある温度差を与えた上で、さらに塗膜表面から太陽光近似日射光源で光エネルギーを照射した場合の試験時間と試験板を通過した熱流の関係を示したものです。

試験板①：一般塗料（N6グレー色）

試験板②：断熱塗料の上塗りに上記の一般塗料（N6グレー色）

試験板③：高反射率塗料（N6グレー色）

図2を見ると、一般塗料と高反射率塗料では、高反射率塗料のほうが試験板を通過する熱流が少なくなっています。屋根に高反射率塗料を塗ると、一般塗料と比べて室内側に流れ込んでくる熱エネルギーが少なくなる様子が良く分かります。

また、下塗りに断熱塗料を塗った場合と塗っていない場合について比べると、こちらも興味深い結果を示しています。膜厚が400～500 μm程度の断熱塗料ですが、

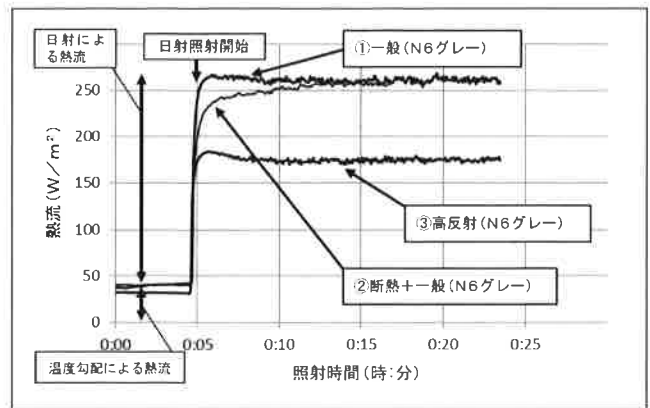


図2 温度上昇試験と熱流センサーの出力

これを下塗りに用いると明らかに熱の伝達が遅れている様子が観察できます。そして、約10分程度の時間が遅れた後、両者は同じ熱を流すようになりました。断熱材の定義について「温度差の維持」が重要だと前述しましたが、この場合、この約10分間が「温度差を維持」した時間になります。この約10分間が有意義となる用途では、この塗料は断熱材として“性能を発揮”していることになり、一方、この時間では不足するような用途では“役に立たない”との意味になるでしょう。ただし、この試験による遅れ時間だけが独り歩きしないように留意する必要があります。あくまでも試験条件で設定した初期温度勾配と日射量の場合にのみ直接比較できるものです。

(3)今後の展開

今回は、熱流による省エネ塗料の評価について簡単な一例を示しました。この例は、簡単な装置で便宜的に行った実験結果なのですが、技術の原理が異なる“省エネ塗料”の性能を横並びで評価できる可能性を示す事が出来たと考えています。そこで、この熱流を評価するアイデアを更に発展させ、何時、誰が何処で行なっても安定した結果が得られる試験方法にまで確立させたいと努力しています。

4. おわりに

本検討は、現在、経済産業省資源エネルギー庁のH24年度「エネルギー使用合理化促進基盤整備事業」の委託業務としても動いています。結果がまとまりましたら、この日塗検ニュースでも逐次紹介していきたいと思っています。今後の展開を見守って頂けますと幸いです。

「高反射率塗料」を始めとする「省エネ塗料」は、日本が世界に誇れる素晴らしい技術だと信じています。日塗検では、この塗料製品（技術）の健全な発展に今後も努力してまいります。