

低比熱、高放射率塗料が塗られた部屋の省エネルギー性

SCE・Net(エネルギー研究会) (正)西村 二郎*

1. まえがき

遮熱塗料というものがある。セラミック系塗料である。この塗料は可視光領域および近赤外領域における放射率の低さから、夏季、直射日光に曝されている屋根などに塗れば、表面温度を劇的に下げる効果がある。表1 に、3 とおりの放射率について1次元伝熱モデルによる計算結果を紹介しておく。

表1 直射日光の遮熱効果

上段はセラミック系塗料、下段は顔料系塗料をイメージ

塗膜の放射率	屋根表面温度	天井表面温度
$\varepsilon/\varepsilon'=0.12/0.95$	40.0 °C	28.7 °C
$\varepsilon/\varepsilon'=0.4/0.95$	51.7 °C	30.2 °C
$\varepsilon/\varepsilon'=0.6/0.90$	60.5 °C	31.3 °C

じている。遮熱目的ならば色は不要だが、外装用塗料となるとそうもいかない。中段はハイブリッドである。計算は直射日光が当たる平坦な屋根についてのものであるが、側壁等も考慮に入れると結果はマイルドになる。この効果は、断熱構造が貧弱な倉庫や作業場などでは、即実感できる。だが、断熱性の良い最近の住宅では、効果を実感し難いかもしれない。しかし、まだ多く存在している断熱性があまり良くない住宅に取っては朗報であることに変わりはない。

セラミック系塗料は空気層が多いことから比熱が低く密度も比較的小さい。遠赤外領域の放射率は高い。このような塗料が壁面・天井等に塗られた部屋でエアコンを使えば、壁面の表面温度は応答が速いので、壁面から放射されてくる暖気/冷気により、体感温度が冬季は上がり夏季は下がるので、省エネになると言われている。

外装の劇的な遮熱効果に魅せられた筆者はこの報告では、その辺の事情につき、化学工学屋の(伝熱工学)の眼で解析をしてみたいと思う。そのために、まず熱に対する壁の応答性について1次元非定常伝熱モデルで解析し、次いで遠赤外線放射効果について考察する。

2. 解析手法(1次元非定常伝熱モデル)

図1 のように、塗膜表面を原点とし、屋外の方向を X 軸とする 1 次元モデルを考える。建物は躯体のコンクリート、断熱材のグラスウール、そして塗膜で成り立っているものとする。建材が 1 種類で、伝熱係数が定数の場合、この伝熱系には解析解がある。詳細は Appendix に譲る。そして $h_2=0$ とおけば、断熱壁に裏打ちされた物質の非定常熱伝導問題ということになり、 $h_2 \neq 0$ とおけば、熱流量の漏洩を意味する。そして塗膜および断熱材の熱容量が躯体に比して小さいことから、時間依存性を無視して

総括伝熱係数に含めて考えれば($h_k \rightarrow H_k$)となり、やはり解析解があることになる。



図1 塗膜-断熱材-躯体

ここで、各構成材の熱特性・寸法をまとめて表示する。

表2 構成材の熱特性値・寸法

	塗膜		顔料系	躯体
	セラミック系	顔料系	グラスウール	コンクリート
l (長さ)	0.001	0.001	0.05	0.1
c (比熱)	0.2	0.2	0.2	0.21
ρ (密度)	100	1300	20	2100
λ (熱伝導率)	0.03	0.25	0.03	1.1
κ (熱拡散率)	0.0015	0.00096	0.0075	0.0025
l/λ (熱抵抗)	0.033	0.004	1.67	0.091
$c\rho l$ (熱容量)	0.02	0.26	0.2	44.1

セラミック系塗料については、ネット上で公開されている熱伝導率が 0.03W/m/deg であることおよび積層された薄肉のセラミックの中空球が主成分であることを頼りに推定した。顔料系塗料については家庭用内装用塗料をイメージしているが、データが乏しいので、顔料および増量剤の種類、量については、やはり推定値である。断熱材はグラスウール、建物の躯体についてはコンクリートとした。なお、単位は長さ(m)、重さ(kg)、時間(hr)、熱量(kcal)、温度(deg°C/K)とした。

内外壁面における伝熱係数は表3 のとおりである。

表3 内外壁面における伝熱係数

	kcal/m ² /hr/deg	備考
h_1 (内壁⇔室内気)	4	放射熱伝達は相殺
h_2 (外壁⇔外気)	20	

3. 具体的評価

さて、塗膜またはコンクリートが断熱壁に接しているときの時定数は次のようになっている。

表4 断熱壁に接している塗膜/コンクリートの時定数

	セラミック系塗膜	顔料系塗膜	コンクリート
時定数	28.2 sec	6.86 min	12.4 hr

ここで、断熱系に接していることは必要条件ではない。

h_2 をパラメーターとして変動させれば、夫々の場合に依りて時定数、平衡温度が定まる(図2参照)。

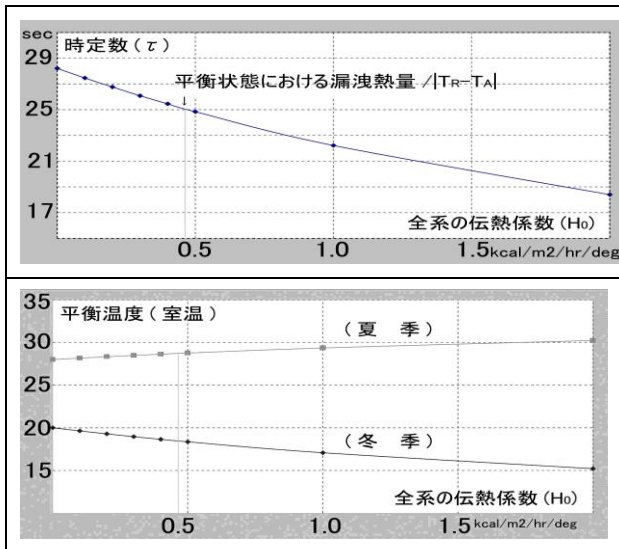


図2 漏洩熱流の影響(時定数、平衡温度)

漏洩熱流の存在により、時定数は短くなり平衡温度のズレは大きくなる。訂正動作を加えれば修正可能と考えられる。つまり、塗膜の存在により、平衡温度への到達時間が早まることは、原理的には、あり得ると考えられる。しかし、この効果は断熱材の存在により殆ど形骸化している。さらに、時定数自体、短くすることは困難だ。理由は比熱を空気に依存している上に、重いセラミックが構成材となっているからである。そのような事情はさておき、平衡温度に早く到達できれば、その分早く設定温度を省エネ側に調整することが可能なので省エネに繋がる。因みに 1deg 省エネ側に変更することができれば 10%の省エネになる。ここでは可能性の指摘に留める。

セラミック系塗膜と顔料系塗膜の時定数の差は、事実上、問題にするほどのことではなさそうである。

外断熱としたときのコンクリートの時定数の大きさは驚異的である。そこで塗膜を H_1 に含め、ガラスウールを H_1/H_2 に含めて内断熱、外断熱としたときの時定数を調べてみた(表5参照)。

表5 内断熱の優位性

	塗膜なし		セラミック系塗膜	
	内断熱	外断熱	内断熱	外断熱
時定数	3.44 hr	10.5 hr	3.45 hr	11.6 hr

この場合は、明らかに内断熱に優位性がある。

4. 遠赤外線放射効果

部屋の居住者には雰囲気からの対流熱伝達、壁面等からの放射熱伝達がある。二つ合わせて、 $q_M =$

$$h_1(T_R - T_M) + f(\epsilon_W, \epsilon_M)\sigma(T_W^4 - T_M^4) \dots (4.1).$$

$$\text{ただし、} f(\epsilon_W, \epsilon_M) = \frac{\epsilon_W \epsilon_M}{\epsilon_W + \epsilon_M - \epsilon_W \epsilon_M} \dots (4.2).$$

ここで、 $T_R, T_W, T_M; \epsilon_W, \epsilon_M; \sigma$ は室温、壁温、衣服を着た居住者の表面温度;壁面の放射率、居住者の放射率、Stefan-Boltzmann 定数である。

平衡状態において T_W と T_R の間に次の関係がある。

$$T_W = \frac{1}{\gamma} \left\{ T_A + \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) h_1 T_R \right\} \dots (4.5),$$

$$\text{ただし、} \gamma = 1 + \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) h_1 \dots (4.6), \text{とおい。}$$

(4.1)式において放射率が変わったときの影響を室温で打ち消すことを考えると、次のようなグラフが得られる。

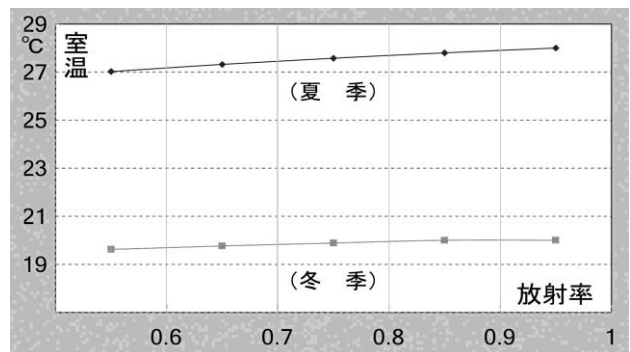


図3 壁面の放射率と設定温度(室温)の関係

省エネ関係は夏季にしか成り立たない。また値もあまり大きくないが省エネ効果はある。遠赤外線効果を論ずるには熱収支以外の要因も必要なのかもしれない。事実、温度分布の均一化に着目した報告¹⁾もある。

参考文献

1)小田貴志 et al : 38th Symposium on Human-Environment System:「住環境における内装仕上げ材と室内空気温度の関係」(2014)

Appendix 数学的取扱い

$$1 \text{ 次元非定常熱伝導方程式: } \frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots (A1).$$

$$\text{解: } \theta(t, x) = \sum_{\infty} A_n \xi_n(x) \exp(-\kappa \omega_n^2 t) + C + Dx \dots (A2),$$

$$\text{ただし、} \xi_n(x) = \cos \omega_n x + \frac{\alpha_1}{\omega_n l} \sin \omega_n x \dots (A3).$$

は (A4) 式で決まる固有値に対応する固有関数である。

$$\tan \omega_n l = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \omega_n l}{(\omega_n l)^2 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (\alpha_k = \frac{h_k l}{\lambda}) \quad (A4).$$

$$C = \frac{\alpha_1(1 + \alpha_2)\theta_R + \alpha_2\theta_A}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1\alpha_2} \dots (A5),$$

$$Dl = \frac{\alpha_1\alpha_2(\theta_R - \theta_A)}{\dots} \dots (A6).$$

なお A_n は初期条件と固有関数の直交性から求める。

*jiro_nishimura@fa3.so-net.ne.jp