

## 第5章 膜の熱物性値の明確化



## 5. 膜材料の熱物性値の明確化

一般的な膜材料の熱物性値(熱伝導率, 日射反射・透過率, 長波長放射率, 透光率)の現状把握を目的に, 物性値の開示状況について調査を行った。また, 理論解析により, 膜の環境性能および環境特性について検討を行う。

### 5.1 物性値調査

一般的な膜材料の熱物性値(熱伝導率, 日射反射・透過率, 長波長放射率, 透光率)の現状把握を目的に, 協会会員に対し, 物性値の開示状況について調査を行った。調査項目は, 熱伝導率, 日射反射率, 透過率, 吸収率, 長波長放射率の5項目である。調査の結果, 5社8種の膜について回答があった。結果の概略を表5-1-1に示す。

表 5-1-1 熱物性値調査結果

膜種	A	I(A)	C	T	C	A	C	C
熱伝導率[W/mK]	0.167	0.233	—	—	0.160	0.1032	—	—
日射反射率[-]	0.780	0.743	—	—	—	—	0.760	0.780
日射透過率[-]	0.128	0.212	—	—	—	—	0.090	0.060
日射吸収率[-]	—	—	—	—	—	—	0.150	0.160
長波放射率[-]	0.896	0.847	—	—	—	—	—	—
透光率 [-]	0.120	—	0.063	0.104	0.110	0.130	0.140	0.080
熱貫流率[W/m <sup>2</sup> K]	—	—	—	—	—	—	5.600	5.600

開示状況を見ると, 日射反射率が未測定, あるいは非公開であった。従って, 今後, 環境建材として普及を図るためには, 日射反射率の測定・公開が急務であることを確認した。また, 現在, 日本膜構造協会のホームページでは, 透光率のみが開示されている。今後, 環境建材としての普及促進を図るためには, 上記項目についての測定および開示が課題であることを確認した。



## 5.2 各種膜材の日射遮蔽性能

一般的な膜材料の日射遮蔽性能の把握を目的に、分光反射率、分光透過率の測定を行った。なお、測定は日本塗料検査協会に依頼している。測定装置は、分光計島津製作所 UV-3150 + MPC-3100(大型試料室)で、入射角 8°、標準白色板には、フッ素樹脂系標準白色板(スペクトラロン,SRS-99-020)を用いた。測定を行った試料を表 5-1-2 に示す。なお、測定は、膜の表・裏毎に 1 回行った。分光吸収率は、反射率と透過率から求めた( $a=1-r-t$ )。測定結果を図 5-2-1~3 に示す。

表 5-1-2 測定試料

試料	膜種	備考
A	A 種, 白色, ガラス繊維織布, PTFE コーティング	0.77mm, 1300g/m <sup>2</sup> , 屋根材
B	B 種, クリーム色, ガラスクロス, 塩化ビニル	0.55mm
C1	C 種, 白色, ポリエステル, 塩化ビニル	0.55mm
C2	C 種, クリーム色, ポリエステル, 塩化ビニル	0.58mm
C3	C 種, クリーム色, ポリエステル, 塩化ビニル	0.66mm
T	テント倉庫, アイボリー, ポリエステル, 塩化ビニル	0.47mm
I	内装材, 白色, ガラス繊維織布, PTFE コーティング	0.37mm, 500g/m <sup>2</sup> , 吸音膜

### (1)測定結果

図 5-2-1 には、各膜材の分光反射率の測定結果を示す。なお、比較のため白色塗料の測定値を併せて示す。白色膜の波長分布は、塗料と同等の傾向を示す。クリーム色の膜は、500nm 以下の傾向が塗料と異なる。A, I の傾向は、他と異なり、近赤外域での反射率が高い。

膜の分光反射率は、大凡 70~90%となっており、高反射塗料同様、ヒートアイランド現象の緩和効果が期待できることがわかる。

図 5-2-2 に分光透過率、図 5-2-3 に分光吸収率を示す。透過率では、可視域の透過率が低い膜が多い。また、近赤外域の透過率が高い。吸収率では、可視域の吸収率が高いことがわかる。600~1600nm では 10%程度となっている。

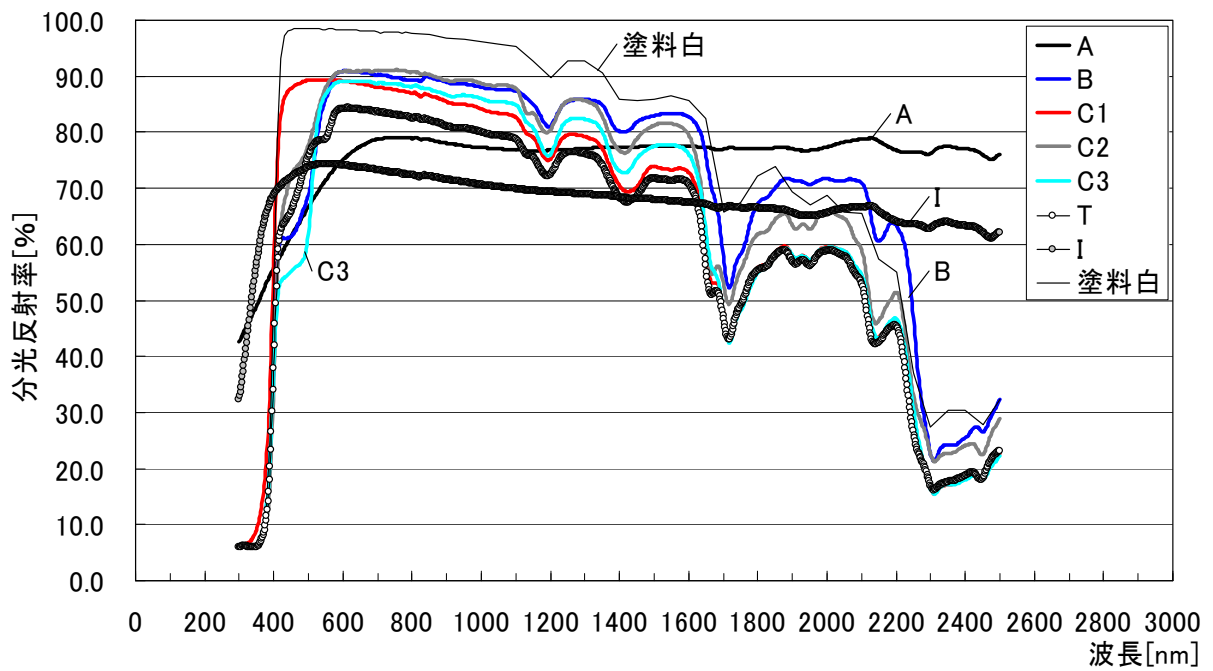


図 5-2-1 各試料の分光反射率(日本塗料検査協会において測定)

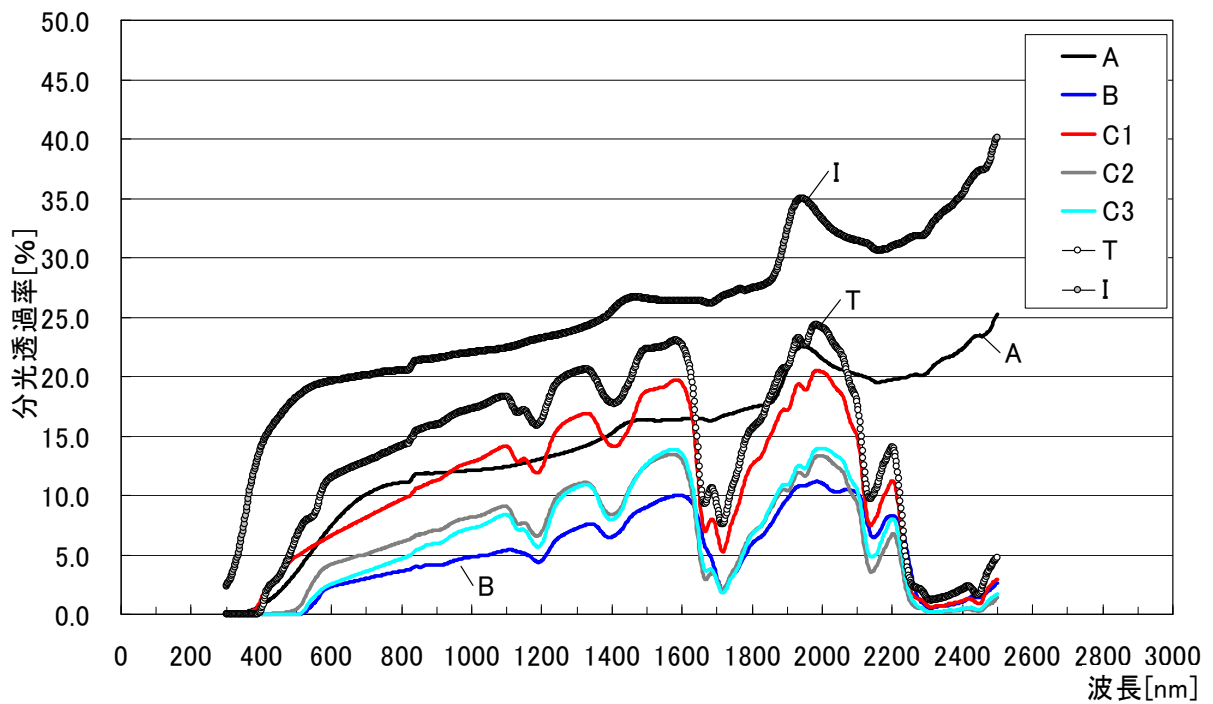


図 5-2-2 各試料の分光透過率(日本塗料検査協会において測定)

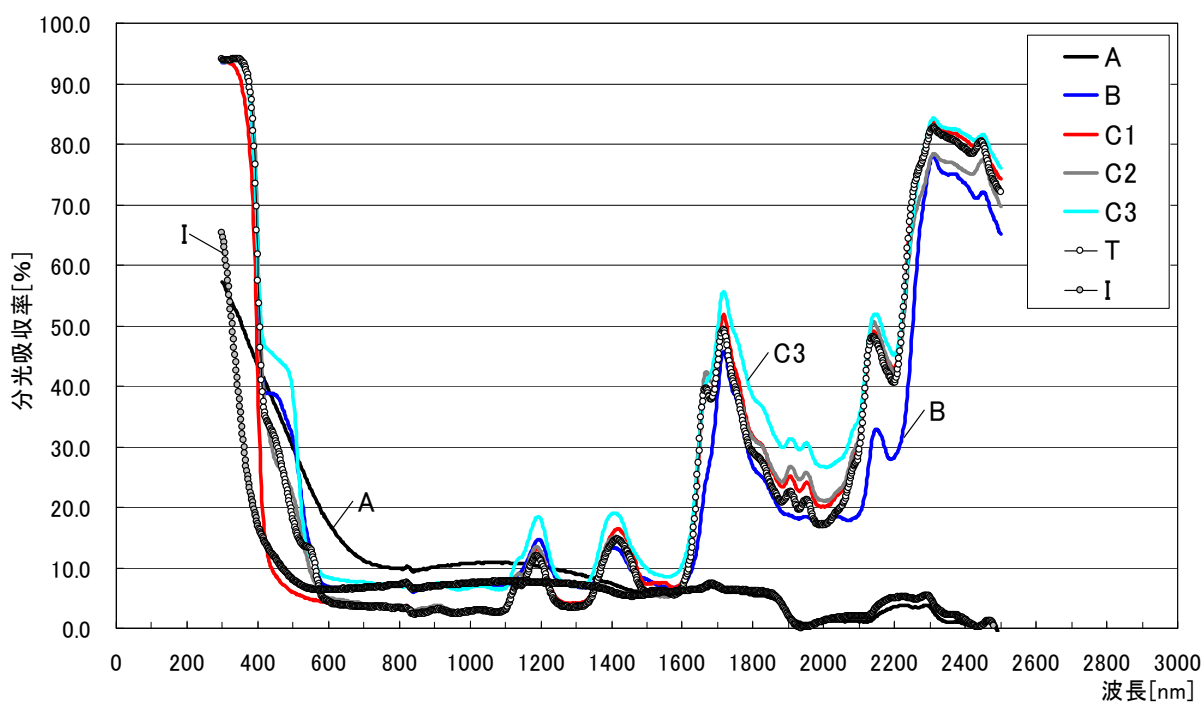


図 5-2-3 各試料の分光吸収率

(2) 各種膜材の日射反射率

測定結果を元に、日射反射率を求めた。基準太陽光には、1000W/m<sup>2</sup> の全天日射(直達+天空)を用いた。なお、基準光の大気状態等は、可降水量 1.42cm, 大気オゾン含有量 0.34cm, 混濁係数(500nm)0.27, エアマス 1.5, アルベド 0.2, 測定面傾斜角 37° である。算出結果を表 5-2-3 に示す。

表 5-2-3 日射反射率, 日射透過率, 日射吸収率の算定結果

試料	全波長域(300~2500nm)			可視光域(300~780nm)			近赤外域(780~2500nm)		
	反射率	透過率	吸収率	反射率	透過率	吸収率	反射率	透過率	吸収率
A	73.46	9.34	17.20	70.38	6.07	23.55	77.59	13.60	8.80
B	78.81	3.15	18.03	76.12	1.50	22.38	82.60	5.29	12.10
C1	80.14	8.70	11.17	82.97	5.76	11.27	76.71	12.49	10.79
C2	79.90	5.00	15.09	78.86	2.81	18.33	81.59	7.85	10.56
C3	75.55	4.17	20.28	73.64	1.81	24.55	78.41	7.21	14.38
T	73.21	11.98	14.81	73.26	8.55	18.19	73.44	16.46	10.10
I	71.15	20.56	8.29	72.30	18.21	9.49	69.71	23.59	6.70

全波長域の日射反射率は、70～80%となっており、高日射反射材料として有用と考えられる。T,I 以外の透過率が 10%以下、吸収率は 10～20%程度となった。吸収率は、当初想定した値(10%)に比べて大きい。

可視域の透過率は、I を除いて低い値となった。また、可視域での吸収率が高い。図 5-2-3 の分光吸収率をみると、400～600nm の吸収率が高いことがわかる。A の結果は、メーカー値に比べて透過率が低い結果となった。原因として、測定場所による性能の偏差が考えられる。測定回数や場所等に関して、今後検討する必要があると思われる。



### 5.3 膜材料の熱性能特性の検討

既往膜材料の熱性能特性の再確認と開発目標の検証を目的に、膜構造建築物に期待される熱性能の明確化について検討を行った。検討項目は、表面の対流熱伝達率、表面の放射率、比熱、相変化材の可能性、二重膜内部の温度性状、二重膜内部の換気効果である。以下では、順次、検討結果について述べる。

#### 1) 熱伝導率

熱貫流率/熱貫流抵抗は、膜材の厚さ、熱伝導率が既知であれば、次式で算出できる。

$$\text{熱貫流率} : K = \frac{1}{R_t} \quad , \quad \text{熱貫流抵抗} : R_t = \frac{1}{\alpha_{to}} + \sum \frac{\ell}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ti}} + R_a \quad (5-3-1)$$

ここで、

$\alpha_{to}$  : 屋外側表面の総合熱伝達率(常用値 25W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_{ti}$  : 室内側表面の総合熱伝達率(常用値 9W/m<sup>2</sup>K)

$\lambda$  : 熱伝導率(W/mK)

$\ell$  : 材料厚さ(m)

$R_a$  : 中空層の熱抵抗(m<sup>2</sup>K/W, 0~10mm まで単調増加。10mm で 0.1 程度)

単層膜において、厚さ、熱伝導率を変更した場合について考える。A 種膜  $\lambda = 0.167$  の場合で、厚さを変更した場合の K 値を図 5-3-1 に示す。厚さのみで、二重膜と同等の K を得るためには、15mm 程度の厚さが必要であり、現実的ではないことがわかる。また、膜厚を 1mm 固定とし、熱伝導率を変更した場合を図 5-3-2 に示す。この場合、二重膜と同等とするためには、熱伝導率を 0.01W/mK 以下にする必要がある。

一般的な膜(0.6mm 厚)の面密度は、1000g/m<sup>2</sup>程度である。これを密度に換算すると 1666.7kg/m<sup>3</sup>となる。また、熱伝導率は、0.1~0.25W/mK である。一般的な建築材料では、密度と熱伝導率に対応関係があることが知られており、図 5-3 のように示されている。膜材をこの図に当てはめた場合、他の材料と同様の対応関係にある。従って、熱伝導率を改変するためには、材質を変更する必要があると考えられる。

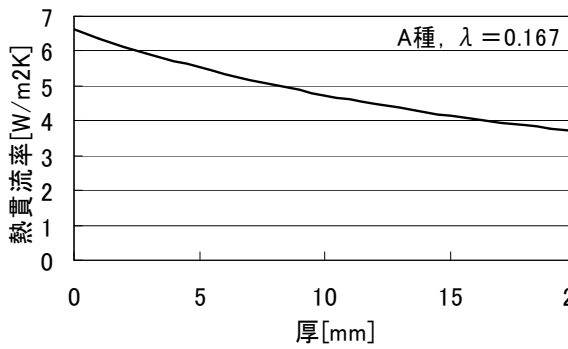


図 5-3-1 膜厚と熱貫流率

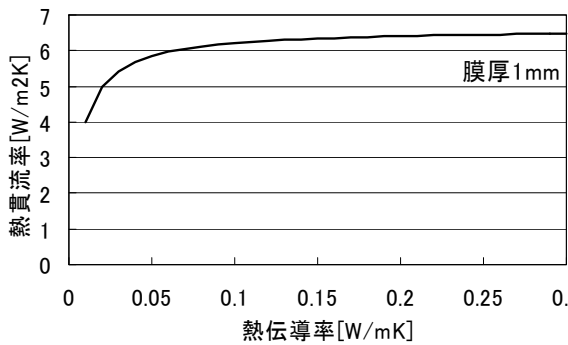
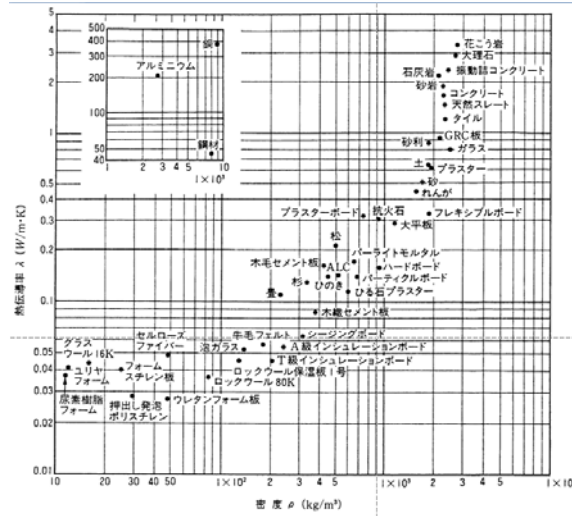


図 5-3-2 熱伝導率と熱貫流率



① 建築材料の熱伝導率と密度の関係<sup>\*1</sup>  
 図 5-3-3 熱伝導率と密度の関係  
 ※日本建築学会建築環境工学用教材，環境 p.48 より引用

## 2) 表面对流熱伝達率

夏季に膜外側表面の対流熱伝達量を大きくできれば、膜の温度を低下させることが可能となり、室内への熱貫流量を低下できる可能性がある。そこで、対流熱伝達率について感度解析を行い、実現可能性について検討する。

外壁表面の対流熱伝達率は、外部風速に依存して定まり、風速が大きいほど、対流熱伝達率が大きい値となる。風速と対流熱伝達率の関係を簡便に表すものとして、以下のユルゲスの式がある。

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 5.6 + 3.9V \quad (V \leq 4.9 \text{ m/s}) \quad \text{W/m}^2\text{K} \\ \alpha_c &= 7.2V^{0.28} \quad (V > 4.9 \text{ m/s}) \end{aligned} \quad (5-3-2)$$

ここで、 $\alpha_c$  : 壁表面の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $V$  : 外部風速 [m/s]

定常の日射受照面の温度上昇を取り扱う方法として、相当外気温(SAT : Sol-Air Temperature)があり、次式で表わされる。

$$SAT = \theta_o + (a_s I - \varepsilon J_n) / (\alpha_{co} + \alpha_{ro}) \quad (5-3-3)$$

- ここで、 $\alpha_{co}$  : 外壁表面の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $\alpha_{cr}$  : 外壁表面の放射熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $a_s$  : 外壁表面の日射吸収率 [-]  
 $\varepsilon$  : 外壁表面の長波長放射率 [-]  
 $I$  : 外壁表面の全天日射量 [W/m<sup>2</sup>]  
 $J_n$  : 外壁表面の夜間放射量 [W/m<sup>2</sup>]

SAT を用いた場合の熱貫流量  $q$ 、熱貫流率は、

$$q = K'(SAT - \theta_i), \quad K' = 1 / \left( \frac{1}{\alpha_{co} + \alpha_{ro}} + \frac{\ell}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ti}} \right) \quad (5-3-4)$$

で表わされる。下式のように変形すると、膜表面の温度を求めることができる。

$$\begin{aligned} \theta_{so} &= SAT - q / (\alpha_{co} + \alpha_{ro}) \\ \theta_{si} &= \theta_i + q / \alpha_{ti} \end{aligned} \quad (5-3-5)$$

これらの式を用い、外部風速を 0~5m/s とした場合における、膜温度の変化について計算を行った。なお、夏季日中を想定し、日射量は 1000W/m<sup>2</sup>、夜間放射 0W/m<sup>2</sup>、室温 26°C、外気温 35°C、膜の日射反射率 80%、吸収率 10%、透過率 10%、熱伝導率 0.16W/mK、膜厚 1mm とした。二重膜の場合では、下膜の日射吸収、膜間の多重吸収は考慮していない。単層膜と二重膜の結果を図 5-3-4 に示す。

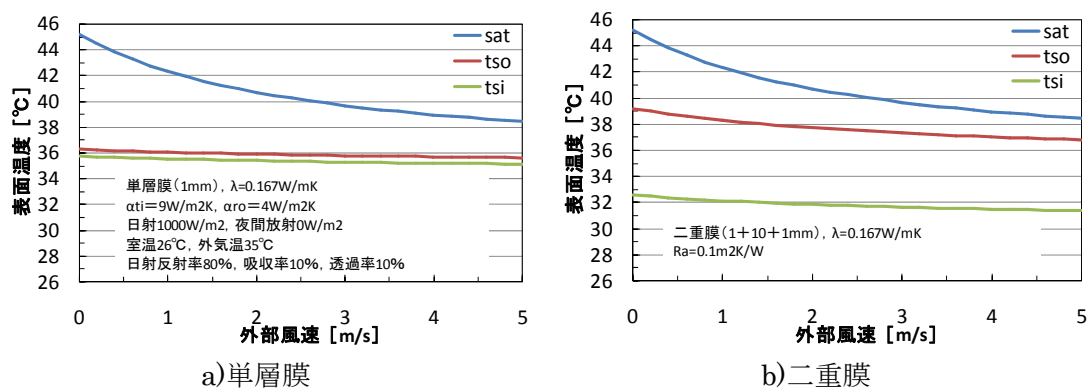


図 5-3-4 外部風速と膜表面温度の関係(夏季)

上式より、風速大→ $\alpha_c$ 大→ $K'$ 大→表面温度低下となるが、結果をみると、単層膜の温度低下は、風速 5m/s 時に、0.6°C程度、二重膜で 1.2°C程度であることがわかる。従って、表面の対流熱伝達率を改変することによる、熱性能の改善効果は少ないものと考えられる。

なお、対流熱伝達とは関係であるが、単層膜と二重膜を比較すると、内側表面温度に 4°C程度の差がみられる。二重膜の場合、膜からの居住者への長波長放射を低減できる可能性がある。

一方、冬季においては、膜外側表面の対流熱伝達量を小さくすることにより、膜の温度低下を防止できる可能性がある。そこで、冬季についても、夏季と同様の感度解析を行った。計算条件は、日射量なし、夜間放射 100W/m<sup>2</sup>、室温 23°C、外気温 0°Cとした。計算結果を図 5-3-5 に示す。

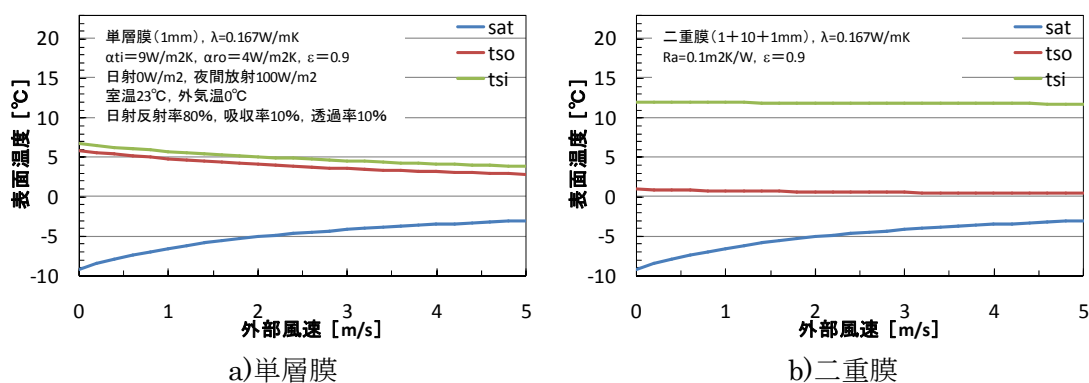


図 5-3-5 外部風速と膜表面温度の関係(冬季)

夏季と同様、風速大→ $\alpha_c$ 大→ $K'$ 大→表面温度低下となるが、結果をみると、単層膜の温度低下は、風速 5m/s 時に、3°C程度、二重膜で 0.3°C程度であることがわかる。従って、表面の対流熱伝達率を改変することによる、熱性能の改善効果は少ないものと考えられる。

なお、対流熱伝達とは関係であるが、単層膜と二重膜を比較すると、内側表面温度に 5~7°C程度の差がみられる。二重膜の場合、膜からの居住者への冷放射感を低減できる可能性がある。例えば、作用温度(OT: Operative temperature)での評価を考えると、周壁の影響を無視して室内の気流が静穏の場合(OT≒グローブ温度),

$$OT = \frac{Ta + MRT}{2} \approx \frac{Ta + Tsi}{2} \quad (5-3-6)$$

となり、単層では OT=14 度、二重膜では OT=17.5℃となる。

風速 4m/s 時( $\alpha_t \doteq 25$  相当)における、単層(K=6.39W/m<sup>2</sup>K)の熱貫流量は 169.6W/m<sup>2</sup>、二重膜(K=3.81W/m<sup>2</sup>K)は 101.1W/m<sup>2</sup>となる(夏季では、単層 82.6, 二重 42.3)。従って、多重化することにより、冷暖房時における省エネルギー効果が期待できる。

### 3) 二重膜内部の温度性状

材料構造分科会が行った U 短期大学体育館の夏季実測結果では、日中、二重膜内部の空気が膜表面温度に比べて高くなり、加熱源となる現象が報告された。ここでは、二重膜内部空気が加熱源となる原因について検討する。

図 5-3-6 は、河端による実測結果である。日中、膜内部温度が高温となり 50℃に達している。また、外膜に比べて 3℃、内膜に比べて 5℃程度高い。夏季日中における日射熱授受と温度の模式図を図 5-3-7 に示す。a)は熱貫流現象からの類推で、b)は実測を模擬している。空気の日射熱吸収は通過長さに依存するが今回の場合、僅かであるため無視できる。膜空気への熱移動は、内外膜表面からの対流熱移動のみとなり、膜内部に熱源がない場合は、a)のような分布となる。

図 5-3-8 は、冬季実測時(14 時)に撮影した膜内部の熱画像である。図をみると、膜を支える構造材の温度が膜表面に比べて高温となっていることがわかる。これは、膜を透過した日射を鋼材が吸収して高温となったものと考えられる。夏季においても同様の現象が生じているとすれば、膜内部の温度上昇は、鋼材が日射を吸収して高温となり、更に鋼材からの対流熱伝達により空気が昇温したことが原因と考えられる。また、実測対象の鋼材は、熱容量が大きいことも加わり、b)のような現象となったものと思われる。対策として、構造材の日射吸収率を下げる事が考えられる。

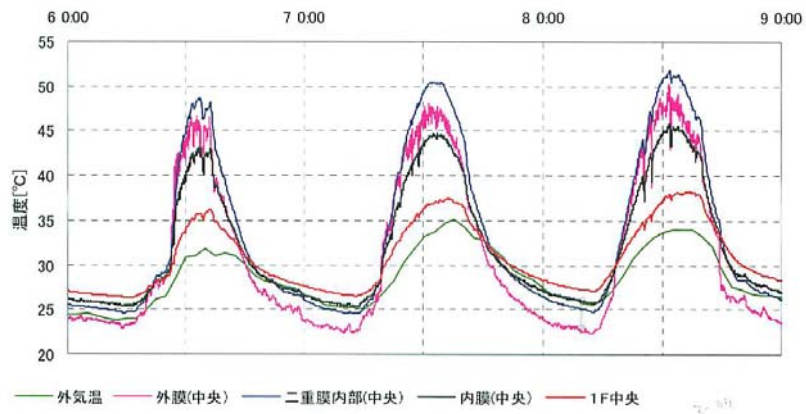


図 5-3-6 U 短期大学の実測結果 (夏季)

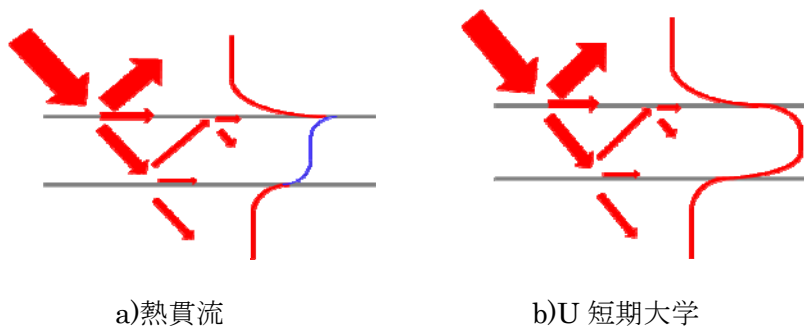


図 5-3-7 二重膜内の日射吸収と温度分布モデル (夏季)

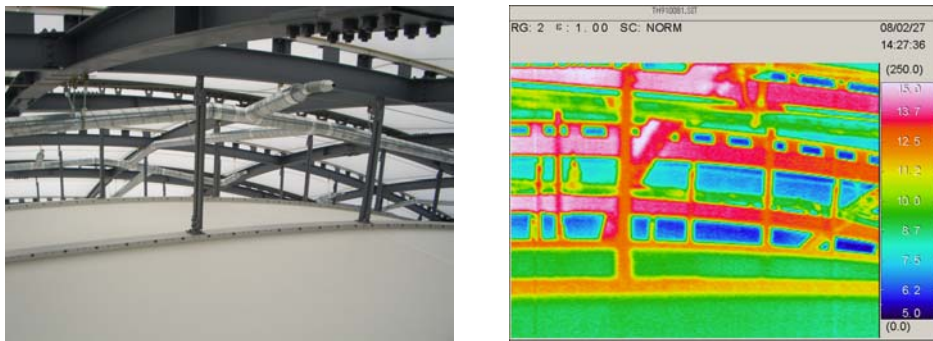


図 5-3-8 二重膜内部と熱画像(冬期日中)

#### 4) 二重膜内部の換気効果

二重膜内部の結露防止を目的とし、換気装置が導入される場合がある。内部を換気することにより、熱を除去できる可能性がある。ここでは、膜内部を換気した場合の熱除去効果について検討する。前節同様、定常を仮定し、日射量  $1000\text{W/m}^2$ 、外気温  $35^\circ\text{C}$ 、室温  $28^\circ\text{C}$ 、外膜の日射吸収率  $10\%$ 、内膜の日射吸収率  $0\%$ 、外部風速  $4\text{m/s}$ 、膜内風速  $4\text{m/s}$ 、換気吹出し温度  $35^\circ\text{C}$ (外気温と同一)の条件で計算を行った。計算結果を図 5-3-9 に示す。なお、換気量は、膜内を十分に換気すること(換気回数  $100$  回/h 程度)を想定している。

単層膜の膜温度は  $36^\circ\text{C}$  程度となる。二重膜換気無しでは内膜  $33^\circ\text{C}$ 、換気有りでは  $33^\circ\text{C}$  程度となる。換気あり、なしでの差異がないのは、換気温度を  $35^\circ\text{C}$  としているためで、外気導入の場合、熱除去の可能性は低いと思われる。ただし、前節のように、構造体の蓄熱が大きい場合は、換気量に応じた効果があるものと思われる。膜温度を低下させるためには、換気温度を低くする必要があり、クールチューブとの併用や、冷房室内の排気利用が考えられる。換気装置導入の際には、送風機風量・吹き出し温度からの除去可能熱量と膜内部の熱負荷の関係を十分に比較する必要があるだろう。

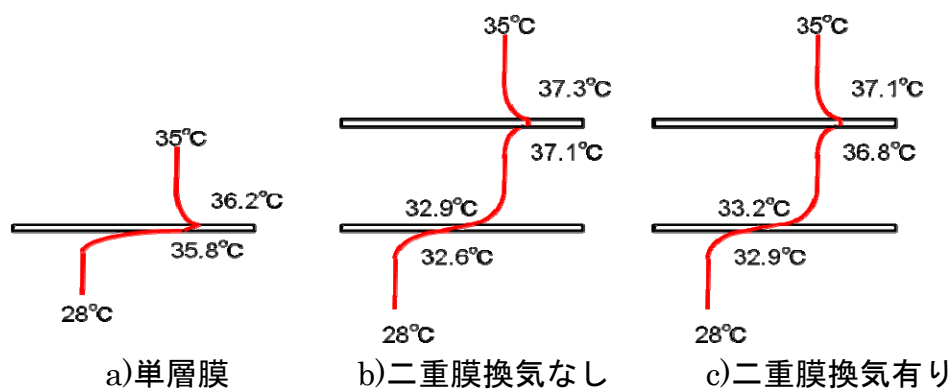


図 5-3-9 膜内の温度分布 (夏季)

## 5) 表面の長波長放射率

Low- $\epsilon$  ガラスのように、膜表面の長波長放射率を改変することにより、熱性能を改善できる可能性がある。ここでは、外表面の放射率をパラメータとした感度解析を行う。

計算では、単層膜で夏季日中と冬季夜間の定常状態を想定した。計算条件は、日射量 1000W/m<sup>2</sup>、夜間放射量 100W/m<sup>2</sup> である。検討に用いた式は、対流熱伝達率の検討と同一である。計算結果を図 5-3-10 に示す。

放射率が大きくなると、SAT が低くなり、表面温度が低下する。一般的な建材の放射率は 0.9 程度である。昨年度の調査で明らかとなった膜の放射率は 0.9 程度であった。改変可能な範囲を現状マイナス 0.2 とすると(0.9→0.7)，夏季は 0.4℃上昇(居住者にとってマイナス側)，冬季は 0.6℃上昇(居住者にとってプラス側)となった。今回の計算では日射吸収率を一定としているため、この条件下では、放射率を小さくすると、放熱しにくくなり、結果として膜温度が上昇する。単層膜の場合、低放射率化と、低日射吸収化の両立が必要と考えられる。

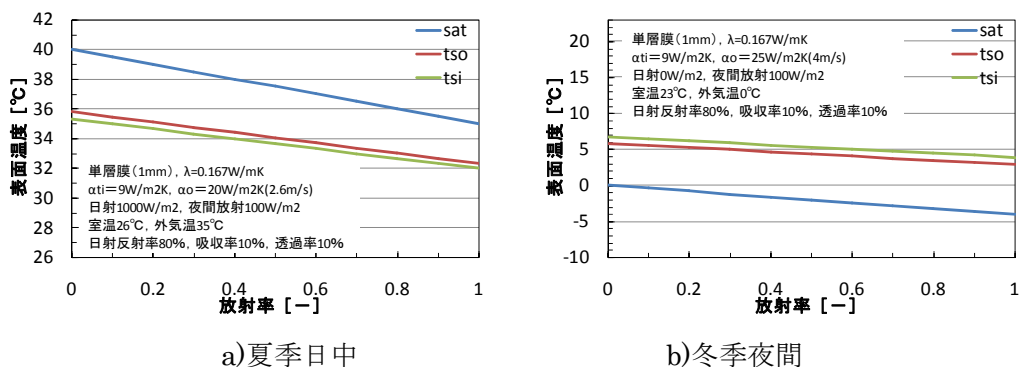


図 5-3-10 放射率をパラメータとした定常計算結果

二重膜の場合、Low- $\epsilon$  ガラスと同じように、膜内部表面の片側の放射率を低くする方法が採用可能である。夏季の場合は外膜の空気層側表面、冬季の場合は内膜の空気層側表面を低放射化することで、冷暖房負荷を低減できる可能性があることを付記する。



## 6) 膜の比熱

膜材の比熱が熱性能に及ぼす影響について検討する。膜の比熱は不明であるため、ガラスと同等と仮定して、容積比熱を以下のように求めた。

膜面密度(0.6mm) : 1000g/m<sup>2</sup>より、密度は 1666.7kg/m<sup>3</sup>となる。ガラスの比熱は、0.75kJ/kgK(750J/kgK)である。なお、グラスウールの比熱は 0.84kJ/kgKでガラスとほぼ同等である。これから、膜の容積比熱は、750×1666.7=1250kJ/m<sup>3</sup>Kと仮定した。空気の容積比熱は 1200J/m<sup>3</sup>K、水の容積比熱は 4190kJ/m<sup>3</sup>Kである。厚さ 1mm の膜 1m<sup>2</sup>の比熱は、1250J/Kとなる。現実には存在しないが水 1mm の膜を考えた場合、比熱は 4190J/Kとなる。膜の日射吸収率 10%の場合で、日射量 1000W/m<sup>2</sup>=1000J/s/m<sup>2</sup>とすると、膜の吸収熱量は、100J/s/m<sup>2</sup>となる。

外気温 35℃、室温 26℃、膜の初期温度 26℃とし、日射 1000W/m<sup>2</sup>下への暴露を考えて、非定常計算を行った。計算結果を図 5-3-11 に示す。なお、比較のため、水膜についても計算を行った。

定常に達する時間は、膜が 130 秒、水膜が 500 秒程度である。膜の場合、日射に対する熱容量が小さいため、温度変化は定常とみなせるだろう。水膜は、膜の熱容量を 3 倍に増加させた場合に相当するが、その場合でも熱容量の影響は小さい。従って、熱容量改編による温度制御は困難と考えられる。

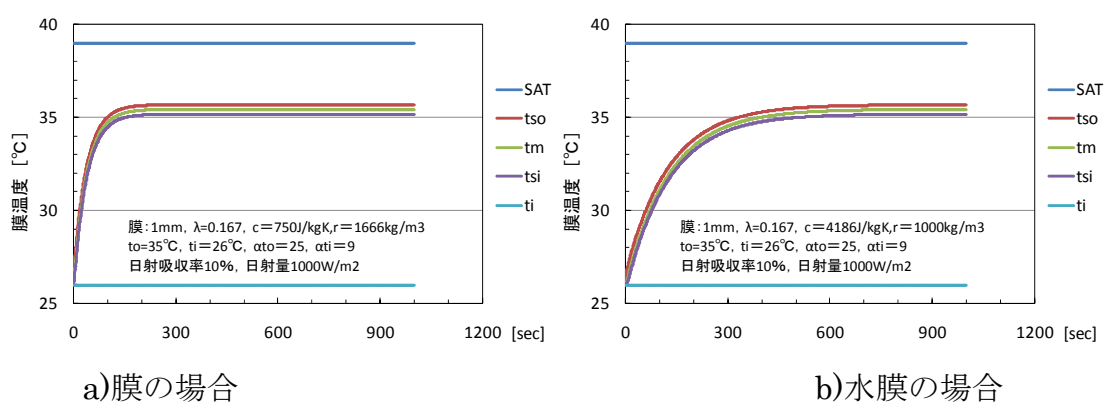


図 5-3-11 非定常解析結果

## 7) 相変化材(PCM)の適用可能性

海外では、膜材に相変化材(PCM)を付加し、膜の日射による温度上昇を抑制した例が報告されている。そこで、膜に PCM を付加した場合の効果について検討を行った。

PCM 膜の比熱が不明であったため、水の物性値(膜の3倍程度)を用いて検討する。PCM の相変化熱量(固体⇒液体)は、文献から 340J/g、相変化温度は、計算の都合上から 31°Cとした。PCM の含有比を 0~100%とした場合について非定常解析を行った。なお、外気温、室温、日射量は、一定とした。解析結果を図 5-3-12 に示す。

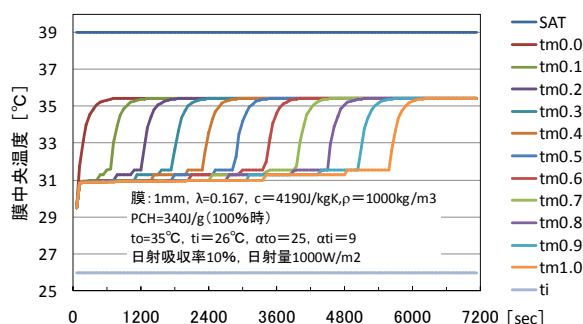


図 5-3-12 PCM 膜の非定常解析結果

想定した膜は、PCM 配合シリコンゴム単体膜に相当する。PCM の混合比が大きくなると、相変化に要する時間が長くなり、その結果温度上昇が抑制される。混合比 100%で 1.5 時間、10%時で 10 分程度の抑制となる。PCM の混合量が多くなれば、温度上昇抑制が可能と考えられる。膜に PCM40%配合シリコンゴムを 1mm コーティングした場合、相変化熱は 150J/g となり、上記解析の tm0.5 に相当する。この場合、1 時間程度、温度上昇を抑制可能となる。ただし、温度上昇を抑制した熱量は、PCM の相変化熱として蓄えられるため、液体から固体に戻る際には、相変化熱分が放熱されることになる。膜に適用した場合、液体から固体に戻る際の放熱分が室内に侵入しないように工夫する必要があると思われる。

#### 5.4 まとめ

膜材料の熱物性値(熱伝導率, 日射反射・透過率, 長波長放射率, 透光率)について, 既往の測定方法を検討した結果, 熱伝導率, 長波長放射率, 透光率の測定は, JIS に則って行うことが望ましいことを確認した。日射反射・透過率については, 現在 JIS 化が検討されている塗膜の測定法に準ずることが望ましいことがわかった。また, 屋外における日射遮蔽性能と夜間放射遮蔽性能の把握を行うためには, 小型模型による暴露実験が望ましいことを確認した。

一般的な膜材料の熱物性値(熱伝導率, 日射反射・透過率, 長波長放射率, 透光率)の現状把握を目的に, 物性値の開示状況について調査を行った。その結果, 日射反射率が未測定, あるいは非公開であった。従って, 今後, 環境建材として普及を図るためには, 日射反射率の測定・公開が急務であることを確認した。

7種の膜材を対象として日射遮蔽性能の把握を行った。各膜(A~D)の分光反射率は70~90%で, 高反射率塗料(塗料白)とほぼ同等の日射反射性能を有しており, 膜材がヒートアイランド現象の緩和効果を有していることを確認した。

以上より, 現状の膜材が有する熱性能が確認された。

