

Si及びAlの無機化合物膜を用いた  
選択放射冷却能のシミュレーションSIMULATION OF SELECTIVE RADIATIVE COOLING POWER OF  
Si & Al INORGANIC COMPOUND THIN FILMS ON METAL SUBSTRATE田澤真人\* 吉村和記\* 三木健\* 種村栄  
Masato TAZAWA Kazuki YOSHIMURA Takeshi MIKI Sakae TANEMURA

## Abstract

Computer simulation of radiative cooling powers of selective infrared radiation films (spectral selective radiating films) using SiO, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> deposited films on Al substrate has been performed. The obtained results are as followings; 1) The relations of the radiative cooling power to film thickness and ambient temperature were obtained. 2) SiO film was the most effective material for sky radiator among these materials. 3) For enabling radiative cooling of SiO film with optimum thickness even in direct sunlight, it is rather important to remove the wavelength region shorter than 700 nm.

**Key words:** Radiative cooling, Atmospheric window, Selective emissivity materials, Optical constants, Computer simulation

## 1. はじめに

選択放射膜は、光の波長が8から13 μm (波数表示で770~1250 cm<sup>-1</sup>) のいわゆる大気窓領域において高放射率を有し、その他の領域で低放射率を有する膜であり、この選択放射性を利用することにより、放射冷却を効率よく行なうことができる。放射冷却は、冬の夜間の晴天時に地上の物質が冷却する現象として、一般に知られており、この現象は夏期でもおこり、うまく使えば、エネルギーの供給なしで、冷却を行なうことができる。しかしそのためには、十分な冷却能すなわち選択放射性を有する膜を得ることが必要であり、特に昼間における冷却を考える場合、太陽光の吸収を放射冷却能より十分小さくするために、太陽光領域で十分な反射率を有すること<sup>1)</sup>も不可欠である。

選択放射膜でなくても赤外領域で放射率を有する物

質を夜間の晴天時の天空に曝すことによって温度が下がる放射冷却の研究の開始は19世紀に遡ることができ、また、選択放射のアイデアもまた、30年以上遡ることができる<sup>1)</sup>。比較的最近の選択放射材料の研究も、シミュレーションも含めてこれまで多くの報告があり<sup>2-10)</sup>、特に、Granqvistらによって材料からラジエータまで系統的な研究が行なわれている。無機物膜を用いた選択放射材料の研究では、Si系材料で放射率の波長依存性が理想に近い材料の探索が行われてきたが、実際の実用化を考える際、あまりに技巧的な材料はかえって使用されにくい。また、GranqvistらはSiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>膜を用いた選択放射材料について主に研究を行なっているが、各種単体の膜の放射冷却能を比較した研究は少ない。ここでは、大気窓近辺に選択的に吸収を有し、容易に入手が可能で膜の作製も比較的容易なSiやAlの無機化合物 (SiO, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)がAl基板の上に積層したシステムについて、放射冷却能を計算、比較した。これらのSi系材料は代表的なSi化合物材料であり、入手は容易であり、アルミナも代表的なセラミックス材料である。なお、結果として得られた最適な膜厚について太陽光入射を考慮し、考察した。

原稿受付 平成4年11月19日

\* 名古屋工業技術試験所 放射線部

\*\* 名古屋工業技術試験所 セラミックス基礎部

\*\*\* 名古屋工業技術試験所 放射線部長

462 名古屋市区平手町1-1

2. 計算方法

2.1 ラジエータの放射冷却能

選択放射材料と断熱容器及びカバーからなるラジエータ(図1)からの放射冷却能を計算する。ここでは、理想的な場合として日射を無視し、熱伝導や対流による選択放射冷却能の低減を無視する。この時、考慮すべき熱の流れは大気とラジエータとの間の放射によるものだけとなり、その収支 $Q_n$  [ $W/m^2$ ]は次の式で表される<sup>1)1-12)</sup>

$$Q_n = \int_0^{\pi/2} 2\pi \sin\theta d\theta \int_0^{\infty} d\lambda [d^2q_r^\uparrow(\lambda, \theta) - d^2q_r^\downarrow(\lambda, \theta)] \quad (1)$$

ただし、 $\theta$ は天頂角[rad]、 $\lambda$ は波長[m]である。また、 $d^2q_r^\uparrow$ と $d^2q_r^\downarrow$ はそれぞれ、単位面積の選択放射膜が単位立体角、単位波長あたりに放射するエネルギー [ $W/m^2/m\text{sr}$ ]と吸収するエネルギーで、次式で表される。

$$d^2q_r^\downarrow(\lambda, \theta) = \tau_c(\lambda, \theta) d^2q_c^\downarrow(\lambda, \theta) + \epsilon_c(\lambda, \theta) \cdot e_c(\lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\lambda d\omega \quad (2)$$

$$d^2q_r^\uparrow(\lambda, \theta) = r_r(\lambda, \theta) d^2q_r^\downarrow(\lambda, \theta) + \epsilon_r(\lambda, \theta) \cdot e_r(\lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\lambda d\omega \quad (3)$$

これらの式と透過率と反射率と放射率の和が1であること、及び

$$d^2q_c^\downarrow(\lambda, \theta) = \epsilon_a(\lambda, \theta) \cdot e_a(\lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\lambda d\omega \quad (4)$$

$$e_a(\lambda) = e_c(\lambda) \quad (5)$$

から、以下の計算で基本となる放射冷却能は次のように表すことができる。

$$Q_n = \int_0^{\pi/2} \pi \sin 2\theta d\theta \int_0^{\infty} d\lambda \frac{\epsilon_r(\lambda, \theta)}{1 - r_c(\lambda, \theta) r_r(\lambda, \theta)} \cdot \{ [1 - r_c(\lambda, \theta)] \cdot e_r(\lambda) - [\tau_c(\lambda, \theta) \epsilon_a(\lambda, \theta) + \epsilon_c(\lambda, \theta)] \cdot e_a(\lambda) \} \quad (6)$$

ただし、 $\tau_x$ 、 $\epsilon_x$ 、 $r_x$ は、透過率、放射率、反射率を表し、添え字c、r、aはカバー、選択放射膜、大気を表す。また、 $e_c$ と $e_r$ はそれぞれ大気温度、選択放射膜温度の黒体の分光放射発散度 [ $W/m^2\text{sr}$ ]である。

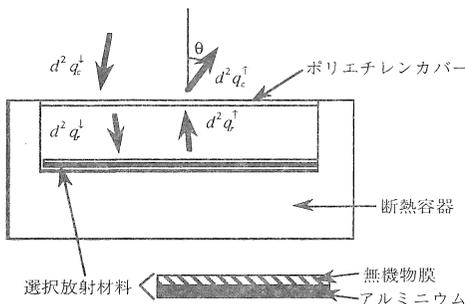


図1 ラジエータのモデル

2.2 選択放射膜の放射率と反射率

ここに考える選択放射膜のモデルは、鏡面を有する新しく高真空蒸着されたAl基板上に適当な厚さの無機物膜を被覆したものとする。したがって選択放射膜の光学的性質は、不透明な基板の上の単層膜モデルを用いて、多重干渉効果を考慮して決めることができる。

Al基板の光学特性は下のドルーデの式で表せるとした。

$$\epsilon = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_r)} \quad (7)$$

ただし、 $\epsilon$ はAl基板の比誘電率、 $\epsilon_\infty$ は十分高振動数での比誘電率、 $\omega_p$ はプラズマ振動数、 $\omega$ は波数、 $\omega_r$ はキャリアのダンピングファクターである。ここでは、各パラメータの値は、文献値を用い、それぞれ $\epsilon_\infty$ は1、 $\omega_p$ は119000  $cm^{-1}$ 、 $\omega_r$ は647  $cm^{-1}$ とした<sup>13)</sup>。

Al基板の上の無機物膜は均一であるとすると、選択放射膜に対するp-, s-偏光振幅反射率 $r_p$ と $r_s$ は次式で表される。

$$r_{p,s} = \frac{r_{1p,s} + r_{2p,s} \exp(-i\delta)}{1 + r_{1p,s} r_{2p,s} \exp(-i\delta)} \quad (8)$$

ただし、 $r_1$ は大気から無機物膜へ光が入射した場合の振幅反射率、 $r_2$ は無機物膜からAl基板へ入射する場合の振幅反射率で $\theta_1$ をスネルの法則から得られる無機物膜中の屈折角として、次式で表される。

$$r_p = \frac{\tan(\theta - \theta_1)}{\tan(\theta + \theta_1)} \quad (9)$$

$$r_s = -\frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta + \theta_1)} \quad (10)$$

また、 $\delta$ は

$$\delta = \frac{4\pi n_1 d \cos \theta_1}{\lambda} \quad (11)$$

と表される。ただし、 $d$ は無機物膜の厚さ、 $n_1$ は無機物膜の複素屈折率、 $\lambda$ は入射光の波長である。本論文において問題となる偏りのない光の入射に対する反射率 $r_t$ は、

$$r_t = \frac{r_p + r_s}{2} \quad (12)$$

に上の式を代入することによって得られる。

また、Al膜は十分な厚さを有すると仮定しているので、透過率は0である。したがって、選択放射膜の吸収率、すなわち放射率は、1から反射率を引いたものとなる。

なお、比較のため、理想的な選択放射膜として、後述するように「大気の窓」と言われる8  $\mu m$ から13  $\mu m$ の波長領域で放射率が1となり、それ以外では0である材料を用いた場合も想定した。

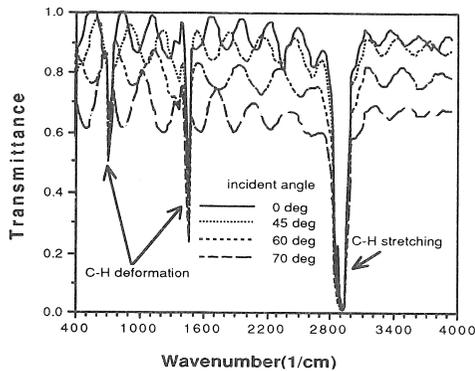


図2 種々の入射角でのポリエチレンフィルム (厚さ20 $\mu$ m) の透過スペクトル。

表1 300Kでの"100 selected ordinates" に対応する波長[ $\mu$ m]

4.825	5.345	5.715	6.018	6.281
6.518	6.736	6.940	7.133	7.317
7.495	7.666	7.833	7.996	8.156
8.313	8.467	8.620	8.771	8.921
9.070	9.218	9.365	9.512	9.659
9.806	9.953	10.10	10.25	10.40
10.55	10.70	10.85	11.00	11.15
11.31	11.46	11.62	11.78	11.94
12.11	12.27	12.44	12.61	12.78
12.96	13.14	13.32	13.50	13.69
13.89	14.08	14.28	14.49	14.70
14.91	15.13	15.35	15.58	15.82
16.06	16.32	16.57	16.84	17.11
17.40	17.69	18.00	18.31	18.64
18.98	19.34	19.71	20.10	20.50
20.93	21.38	21.86	22.36	22.89
23.46	24.07	24.72	25.42	26.18
27.01	27.91	28.91	30.03	31.29
32.72	34.37	36.32	38.68	41.62
45.46	50.85	59.37	77.04	317.0

### 2.3 ラジエータのモデル

選択放射膜は理想的に断熱され、カバーを用いることによって大気との対流による熱交換はないとする(図1)。更に試料から大気を眺める立体角は $2\pi$ であるとする。このことは、選択放射材とカバーが無限小の距離だけ離れていることを意味する。この設定は現実的でないかも知れないが、後で述べるように、天頂角の大きい方向への選択放射材からの放射は放射冷却能にほとんど寄与しないことから、計算を簡単にするためにこの仮定をしても差しつかえない。カバーは

市販のポリエチレン膜(厚さ20 $\mu$ m)を用いることとし、実際の透過率の測定値(図2)を放射冷却能の計算に用いた。ただし、各入射角での透過率が必要であるので、入射角0度、45度、60度、70度で測定を行ない、他の入射角での透過率はそれらから推定した。また、反射率はC-H結合の伸縮振動と変角振動による吸収線を除いて、1から透過率を引いて求めた。放射率は、吸収線近辺で1から透過率と反射率を引いて求めた。

### 2.4 数値積分法

式(6)を実際に計算する時には、天頂角 $\theta$ と波長 $\lambda$ についての積分を行う必要がある。このうち、波長についての積分では、ほとんどが大気温度と試料温度での黒体放射の分布に係数を加えた値の積算であり黒体放射の波長分布は、特に長波長側で低強度の裾を長く引いているので、黒体放射の強い波長領域では積分間隔を小さくする"100 selected ordinate"法<sup>14)</sup>(SO法)を用いた方が、数値積分の間隔を均一に取る"weighted ordinate"法(WO法)を用いるより短時間に精度よく計算を行うことができる。このSO法では、黒体放射の分布曲線をいくつかの等しい面積を有する部分に予め分割しておく必要がある。ここでの計算では大気温度を300Kとしたので、300Kでの黒体放射の"selected ordinate"を100点計算し、実際の数値計算に用いた。対応する波長の値を表1に示す。期待されるとおり、大気の窓領域付近では、分割が細かくなっている。なお、角度の積分については、50分割の和を取った。

### 2.5 各種材料の光学定数

計算に用いた材料の光学定数( $n$ ,  $k$ )のうち、SiOとSiCについては文献値<sup>15)</sup>を用い、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>についてはバルクセラミックスについて当研究室で実験的に得た値<sup>16-18)</sup>を用いた。図3に用いた光学定数を示す。なお、これらの図の範囲外の波数での光学定数は、推定によって決めた。波長25 $\mu$ m以上の領域には、300Kの黒体放射のうち約17%が含まれるが、光学定数を推定することによって、この領域での誤差は相当量低減できると考えられる。

### 2.6 大気からの放射

大気の放射率は、文献<sup>19)</sup>で与えられている大気(水蒸気圧3cmH<sub>2</sub>O)の分光放射輝度と黒体の分光放射輝度から導出した分光放射率(図4)を用いた。大体8から13 $\mu$ mで放射率が低くなっており、大気がこの領域で透明度が高いことを示している。図中の数字は、天頂角である。

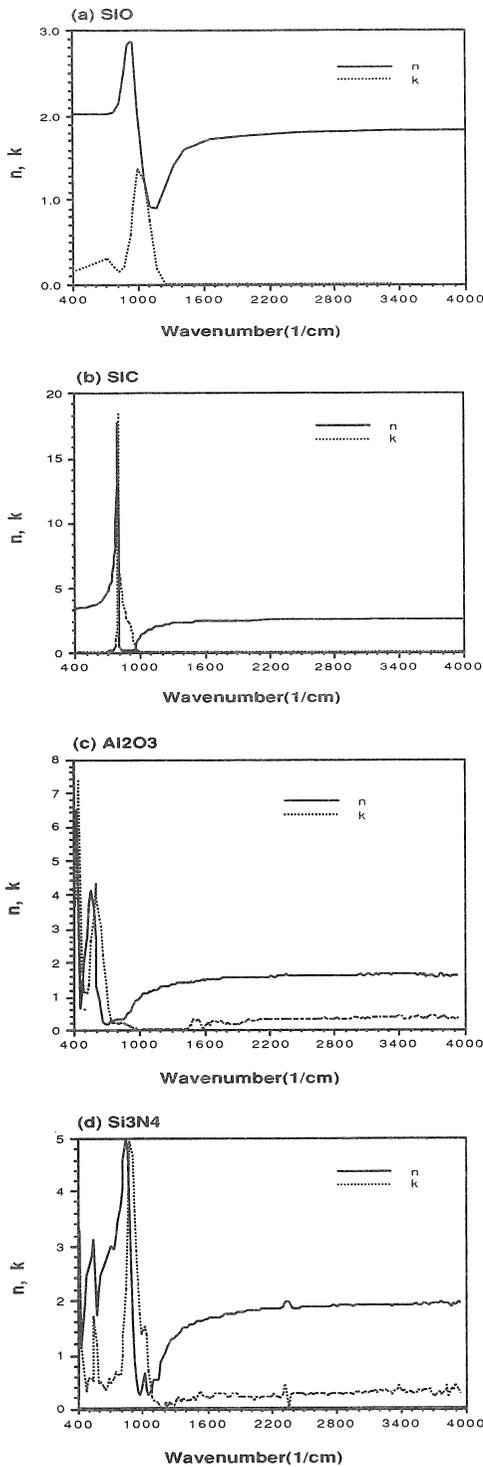


図3 各種材料の光学定数. SiOとSiCについては文献値<sup>15)</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>については測定値.

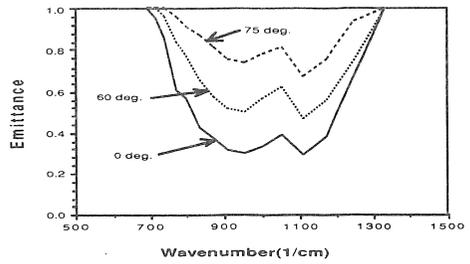


図4 大気放射率の天頂角依存性. (文献<sup>19)</sup>から導出)

### 3. 結果

#### 3.1 材料別の放射冷却能

各種の材料の放射冷却能を図5に示す. 横軸は地表付近の大気温度 ( $T_a$ ) と試料温度 ( $T_s$ ) との差, 縦軸は  $[W/m^2]$  を単位とした放射冷却能である. 従って, 横軸と交わる点から断熱を理想的なものとした場合の到達温度がわかる. 大気温度は300Kとした. また, 比較のために図6に理想的な選択放射膜の放射冷却能と黒体の放射冷却能をそれぞれ示した.

図6で大気温度と試料温度の差が小さい領域では, 黒体の放射冷却能の方が理想的な選択放射膜のものよりわずかに大きい, これは, ここで用いた大気分光放射率が1でない領域が, 図4でわかるように  $8\mu m$  と  $13\mu m$  の範囲より少し広いことに起因する.

図5から, SiOを用いた場合が, 大気温度 ( $T_a - T_s = 0$ ) での放射冷却能が最も高く, 到達温度の最も低い値が得られるが, 図6の理想の場合と比較すると, 大気温度での放射冷却能は約70%である. 黒体の場合, 大気の窓以外の領域での大気からの赤外吸収の効率が非常に高いので, 試料温度が下がると大気の窓以外での熱平衡状態が崩れ熱の流入が始まり, 放射冷却能は急速に低下し, 到達温度を見るかぎり他の材料でも黒体の場合より低温に達する. ただし, SiCの場合には放射冷却能の最大値は他の材料と比較して十分小さいことに注意を要する. その原因については考察で述べる.

#### 3.2 放射冷却能と膜厚の関係

放射冷却能は材料の膜厚と試料温度に強く依存していることが図5から明かである. すなわち, 試料温度が大気温度と比較的に近い温度領域では, 膜厚が大きいくほど大気の窓領域での放射率が高くなるため, 放射冷却能は大きい. しかし, 厚くなり過ぎると大気の窓領域以外での大気からの赤外光の吸収も無視できなくなるため, 最低の到達温度を得るためには, 膜厚の最適値が存在する. これは, 材料によって異なっており, SiOでは約  $1\mu m$ , SiCでは約  $300nm$ , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では約  $200nm$ , Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>では約  $400nm$ , であった.

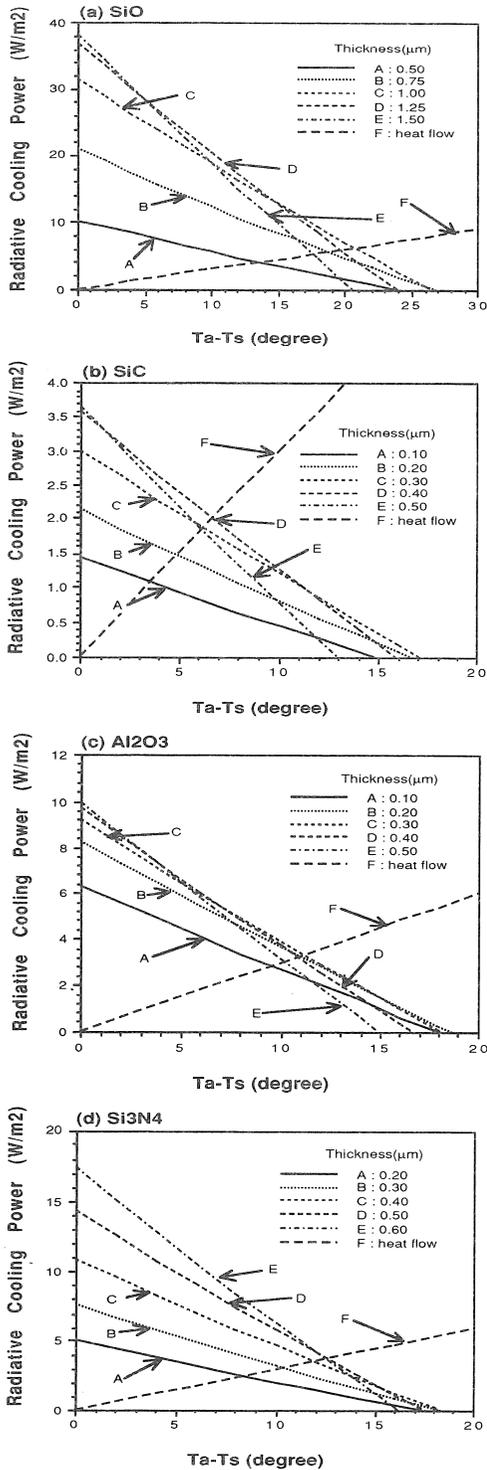


図5 各種材料を用いたラジエータの放射冷却能。横軸は大気と試料の温度差、A-Eは各膜厚(μm)での放射冷却能、Fは背面や側面からの熱の流入量。

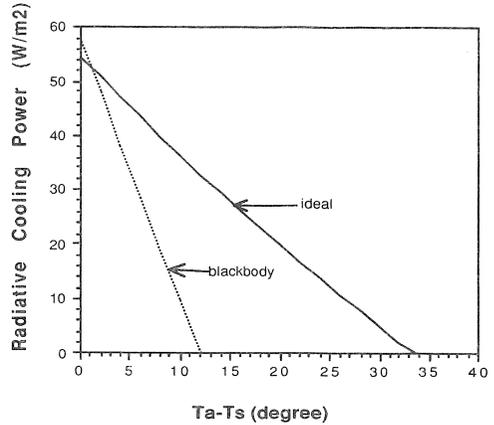


図6 理想的な場合と黒体を用いた場合の放射冷却能

### 3.3 実際の冷却実験のシミュレーション

上で述べた計算では、背面もしくは側面からの熱の侵入を考慮していない。実際の放射冷却実験を念頭においた放射冷却能を計算するには、これらの断熱材を通じた熱の流入効果も考慮しなければならない。

背面や側面からの熱の流れは、試料温度と気温の差に比例するので、図に直線として表すことができる。これを図5中に"heat flow"として示した。ただし、熱貫流率を0.3[W/(m<sup>2</sup>℃)]とした。したがって、正味の放射冷却能は図の放射冷却能から熱の侵入による熱量を差し引いた値となる。また、放射冷却能を表す曲線とこの直線との交点が放射冷却による熱の放出と背面もしくは側面からの熱の流入が釣り合った状態を表し、この点のX座標が実際の放射冷却実験で予想される到達温度である。

熱の流入を考慮すると、最高の温度差を得るための最適の膜厚が変わることに注意すべきである。

## 4. 考察

### 4.1 最適の膜厚について

最適の膜厚は、大気の窓領域での高放射率すなわち高吸収率、およびそれ以外の領域での高反射率を実現する厚さである。ここでの選択放射材料は、透過率が常に0であるため、無機物膜側から入射した光は吸収されるか反射されるかであるが、このうち、空気と無機物膜の界面での反射率は膜厚に関係なく決まっているため、吸収率の膜厚依存性は、無機物膜内の多重反射を無視した場合、無機物内で吸収された光とAl基板の面で反射され、再び空気中へ戻る光の割合から決まる。従って、選択放射材料の放射率は各波長領域での無機物膜の吸収率の膜厚依存性から近似的に考察することができる。

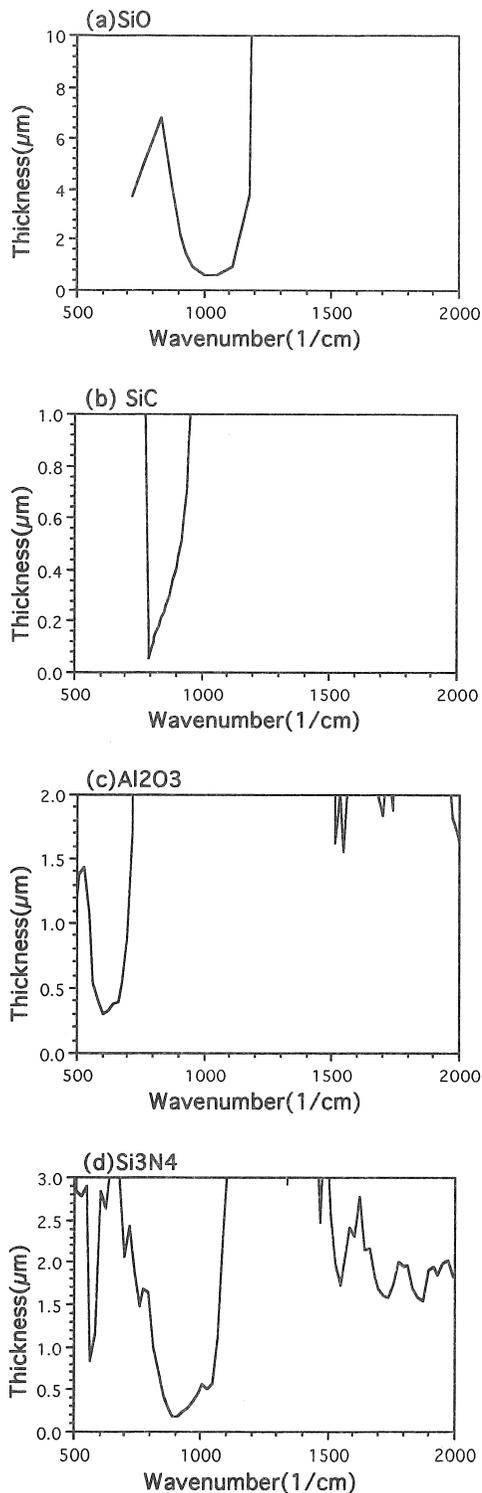


図7 膜の放射率が約63%となるのに必要な厚さ。

図7にそれぞれの材料について吸収係数の逆数を示した。吸収係数の逆数は入射光が $1/e$  ( $e$ は自然対数の底)まで減衰するために必要な厚さであり、この厚さの膜は、バルクの放射の $(1-1/e)$ 倍、すなわち約63%を放射すると考えられる。例えば、SiOでは $900\text{cm}^{-1}$ から $1150\text{cm}^{-1}$ での十分な放射を得るのに1から $2\mu\text{m}$ が必要であり、この程度の厚さでは、他の領域では放射が得られない、すなわち透明であることを示している。透明であれば、裏面のAlによってほぼ100%反射されるので、効率よく選択放射が起こる。SiCでは、大気の窓領域内に選択的に放射が得られる部分があるものの、その波数領域がSiOに比べて狭いために効率よく選択放射が起こらない。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では $600\text{cm}^{-1}$ 付近にある膜厚で選択的に放射が得られる部分があるが、大気の窓領域とずれているために大きな放射冷却能が得られない。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>では、選択的に放射が得られる領域が大気の窓とほぼ一致しているが、その他の領域でも放射の大きな領域があり、余分な大気からの放射を吸収するため、効率よく選択放射が起こらない。

#### 4.2 カバー温度と大気温度の差

平板型集熱器において考慮される風による強制冷却の対流熱伝達率 $h_w$ の考慮をしてみる。 $h_w$ はMcAdamsによる実験式<sup>20)</sup>を用いる。

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad (13)$$

ここで、 $v$ は風速[m/s]を意味する。カバー材としてポリエチレンシートを想定しているが、ポリエチレンは大気の放射が大きい赤外領域では吸収係数が、特定の吸収バンドを除いてほとんど0であり、上記の風による強制、冷却または、強制加熱の効果以外の熱交換は吸収バンドでの放射吸収を考えるだけでよい。C-H結合の伸縮振動と変角振動による吸収線から見積った300Kのポリエチレンフィルムからの熱放射は約 $1.7\text{W/m}^2$ であった。この熱放射を大気からの熱の移動でキャンセルするための大気とフィルムの温度差は、風速が0の場合でも約0.3度が必要となるだけであり、この差はここでの計算では十分無視でき、

$$e_a(\lambda) = e_c(\lambda) \quad (14)$$

としてよいことが確認できた。

#### 4.3 放射強度の角度依存性について

放射冷却能の角度依存性を図8に示す。この図からわかるように、選択放射材料面の垂直方向から80度以上傾いた方向への放射は無視できる。この結果から、実際のラジエータでは、選択放射材料が天頂角80度以上で天空を見込む必要があることがわかる。

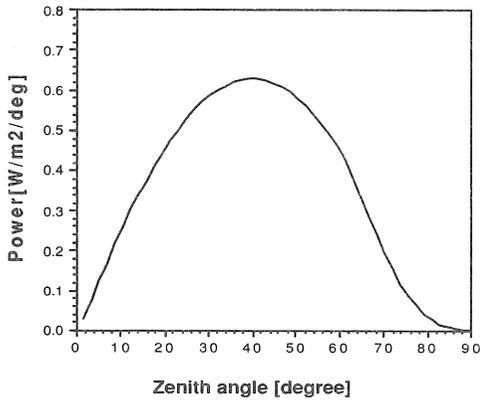


図8 放射強度の角度依存性. 横軸は天頂角、縦軸は天頂角1度当りの放射冷却能.

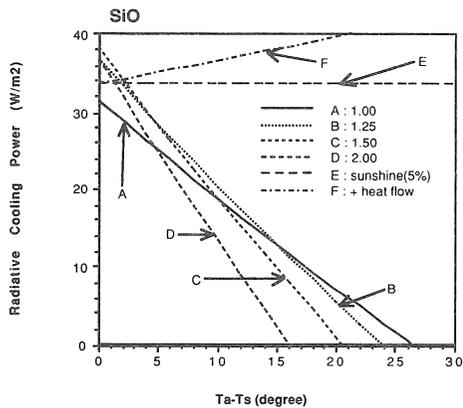


図9 SiO<sub>2</sub>の放射冷却と太陽光入射. A-Dは各膜厚(単位は $\mu\text{m}$ )でのSiO<sub>2</sub>膜を用いた選択放射材料の放射冷却能, Eは太陽直達日射量の5%, FはEに背面や側面からの熱の流入量を加えたもの.

#### 4.4 太陽入射光のある場合

昼間でも放射冷却を使用しようとする場合、太陽光入射による熱の流入を考慮しなければならない。太陽光の95%が反射されたとした場合の熱の流入量を図9に、SiO<sub>2</sub>を用いた場合の放射冷却能と共に示す。

太陽光入射を考慮すると、95%が反射されとしても厚さ $1\mu\text{m}$ のSiO<sub>2</sub>を用いた場合では冷却は起こらず、 $1.5\mu\text{m}$ の厚さが最適で約 $2.2^\circ\text{C}$ 冷却される。また、他の材料では放射冷却能が低いために、太陽光下での放射冷却は期待できない。

逆に言えば、SiO<sub>2</sub>を用いた場合でも太陽光からの吸収が $34\text{W/m}^2$ 程度でなければならない。しかしながら、

図10に示したようにSiO<sub>2</sub>の可視領域での吸収率は比較的短波長側で大きく、AM1.5の場合には、カバー材料の透過率を1として、 $295\text{W/m}^2$ 程度吸収すると見積られる。したがって、SiO<sub>2</sub>を用いて昼間の放射冷却を行おうとする場合、可視光を約90%以上反射させるカバー材料等を開発する必要がある。

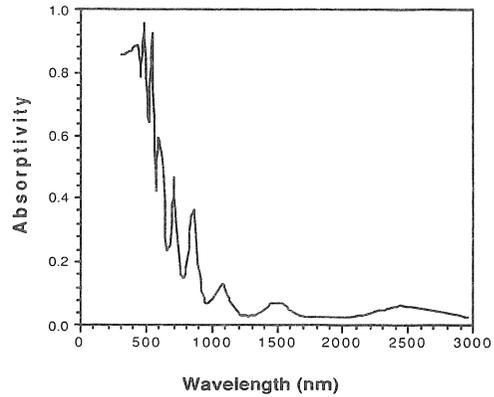


図10 可視領域での吸収率

#### 5. まとめ

数種の無機物膜を用いた選択放射材料の放射冷却能の計算をラジエータと大気の放射率の波長分布と角度分布を考慮して行った。計算の結果、次のような知見が得られた。1) SiO<sub>2</sub>を用いた場合が最も大きな放射冷却能を与えた、2) 各材料には、最低の温度を得るためのそれぞれ最適の膜厚が存在し、SiO<sub>2</sub>の場合、約 $1\mu\text{m}$ であった、3) ラジエータの断熱が不完全な場合、最適の膜厚は理想的に断熱された場合とは異なる、4) SiO<sub>2</sub>を用いたラジエータを直射日光下に曝した場合、太陽光のうち、特に可視領域の光を排除する工夫が必要である。

#### 参考文献

- 1) T. M. J. Nilsson and G. A. Niklasson: "Optimization of optical properties of pigmented foils for radiative cooling applications: Model calculations." : SPIE Proceedings 1536(1991)169-182.
- 2) T. S. Eriksson, E. M. Lushiku, and C. G. Granqvist: "Materials for radiative cooling to low temperature": Solar Energy Materials 11(1984)149-161.
- 3) P. Berdahl: "Radiative cooling with MgO and/or LiF layers": Applied Optics 23(1984)370-372.
- 4) T. S. Eriksson and C. G. Granqvist: "Infrared optical properties of electron-beam evaporated silicon oxynitride films": Applied Optics, 22(1983)3204-3206.
- 5) C. G. Granqvist: "Radiative heating and cooling with spectrally selective surfaces": Applied Optics 20(1981)2606-2615.

- 6) A. Hjortsberg and C. G. Granqvist : "Infrared optical properties of silicon monoxide films" : Applied Optics 19(1980)1694-1696.
- 7) S. Catalanotti, V. Cuomo, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, and G. Troise : "The radiative cooling of selective surfaces" : Solar Energy, 17(1975)83-89.
- 8) T. S. Eriksson, S.-J. Jiang and C. G. Granqvist : "Surface coatings for radiative cooling applications : Silicon dioxide and silicon nitride made by reactive rf-sputtering" : Solar Energy Materials, 12(1985)319-325.
- 9) C. G. Granqvist and A. Hjortsberg : "Surfaces for radiative cooling : Silicon monoxide films on aluminum" : Appl. Phys. Lett. 36(1980)139-141.
- 10) T. S. Eriksson and C. G. Granqvist : "Radiative cooling computed for model atmospheres" : Applied Optics 21(1982)4381-4388.
- 11) 松田、寺田、伊藤 : "放射冷却の基礎実験"、太陽エネルギー 10(1984)33-40.
- 12) B. Bartoli, S. Catalanotti, B. Coluzzi, V. Cuomo, V. Silvestrini, G. Troise : Nocturnal and diurnal performances of selective radiators, Applied Energy, 3(1977), 267.
- 13) M.A. Ordal et al. : "Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared" ; Applied Optics 22(1983)1099-1119.
- 14) Y. S. Touloukian and D. P. DeWitt : Thermophysical Properties of Matter, Vol. 8 (1972), Plenum, pp.17a-19a.
- 15) Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press(1985), ed. by E.D.Palik, pp.765-769.
- 16) S.Tanemura et al. : Proc. of 2nd Asian Thermophysical Properties conference(Sapporo,1989), p.185.
- 17) 種村、田澤、吉村 : "低放射率膜の赤外分光特性"、平成元年度日本太陽エネルギー学会研究発表会講演論文集(1989)145-148.
- 18) 田澤、吉村、種村 : 太陽エネルギー 17(1991)35-42.
- 19) Marlo Martin : Passive Cooling, MIT Press(1989), ed. by J.Cook, pp.138-196.
- 20) W. H. McAdams : Heat Transmission(3rd ed.), (1954), McGraw-Hill.