

宮崎大学大学院  
博士学位論文

放熱材料の開発とその応用に関する研究

2019年3月

宮崎大学大学院農学工学総合研究科  
物質・情報工学専攻

仲村 聡史

## 概要

本研究では、物質の構造によって異なる特定の赤外域でのエネルギー放射に着目し、40～100℃の温度域で機能する無機フィラーを選定して、密閉空間での熱対策が必要な電子機器と、屋外に設置される太陽光モジュールの熱対策について、放熱塗料の有効性を検証した。

特定温度での熱放射は、放熱塗膜や無機フィラー自体の熱放射率よりも特定波長における無機フィラーの熱放射特性が重要であり、ターゲットとする40～100℃の温度域では、ウィーンの変位則より導かれた7.8～9.3  $\mu\text{m}$  の領域近辺に高い赤外線放射特性を持つ  $\text{CaF}_2$  を含む放熱塗膜が最も有効であった。

$\text{CaF}_2$  を含む放熱塗料は結晶型シリコン PV モジュールの熱対策にも有効であり、バックシート上に形成した放熱塗膜によりモジュールの作動温度は2～3℃下がり、開放電圧は0.1V向上した。

さらに屋外に設置される PV モジュールの対流による効果を想定し、熱伝導率フィラーとして SiC を選択し、風洞実験で輻射と対流の効果を比較した。

無風、風速1～4m/sでは輻射による放熱効果が高く、4m/s以上では対流の効果が高い結果となった。10m/s以上では、固体表面よりも接触する媒体のファクターが大きくなり、放熱塗料の効果はほとんどなくなった。

$\text{CaF}_2$  のような特定の温度域での熱放射を高める無機フィラーを用いることにより、密閉空間でも効果的な放熱が可能となるが、さらに SiC に代表される熱伝導性の高い無機フィラーと組み合わせることにより、屋外で使用される PV モジュールにも放熱塗料が有効であることを確認した。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 電子機器の熱対策	2
1.1.2 放熱の原理と手段	4
1.1.3 熱放射による熱移動	7
1.2 本研究の目的	9
1.3 本論文の構成	10
1.4 引用文献	11
<b>第2章 放熱塗料の設計</b>	12
2.1 諸言	12
2.2 実験方法	15
2.3 結果と考察	19
2.3.1 放熱塗料の選択的赤外吸収特性	19
2.3.2 放熱塗料の冷却効果	23
2.3.3 放熱塗料の材料設計	27
2.4 結言	30
2.5 引用文献	31
<b>第3章 シリコン太陽電池モジュールにおける放熱塗料の効果</b>	35
3.1 諸言	35
3.2 実験方法	41

3.3	結果と考察	43
3.3.1	放熱性能の温度依存性	43
3.3.2	放熱効果の検証	46
3.4	結言	49
3.5	引用文献	50
<b>第4章 有風時に効果を発揮する放熱塗料の設計とその効果</b>		<b>52</b>
4.1	諸言	52
4.2	実験方法	53
4.2.1	放熱塗料の調製	53
4.2.2	試験体	54
4.2.3	試験体の固定方法	55
4.2.4	風洞	56
4.2.5	実験手順	57
4.3	実験結果と考察	60
4.3.1	有風時に効果を発揮する放熱塗料の材料設計	60
4.3.2	風洞実験による放熱性能の確認（試験1）	63
4.3.3	風洞実験による放熱性能の確認（試験2）	67
4.3.4	放熱効果の検証	71
4.4	結言	72
4.5	引用文献	73
<b>第5章 結論</b>		<b>74</b>
謝辞		76

# 第 1 章 序論

## 1.1. 研究背景

近年、世界規模で地球温暖化対策や新エネルギー関連の開発に拍車がかかっており、自然エネルギーを利用した太陽光発電や風力発電の開発、燃焼に伴う環境影響を軽減した HV 車、EV 車の開発や、そのための電池の高効率化の技術開発などが加速化している。また、昨今のエレクトロニクス機器は小型化と高性能化が進み、機器の電力密度（単位体積あたりの消費電力）や部品の発熱密度（単位表面積あたりの発熱量）が増大している[1]。電気・電子機器における熱対策は、使用されている電子デバイスの性能や製品寿命を左右する重要な因子であり、近年は、熱伝導、対流、熱放射の 3 つの熱輸送の機構を総合的に活用するサーマルマネジメントが重要視されている。その中で熱放射は、被放熱体の温度にその効果が大きく依存するため、これまでは 100 °C 以下の比較的低温領域の放熱が問題となる一般的な電気・電子機器では活用されていなかった。しかし、空間的に絶縁された状態でも電磁波によって熱を系外に放出でき、特別な機構や部品、追加のエネルギーを要しない、対象物の表面に薄膜を形成するのみで放熱の効果が得られる熱放射の活用は今後重要度が増すと考えられる。

### 1.1.1 電子機器の熱対策

一般に電子機器の温度が高くなると、次のような不具合を生じるといわれている[1]。

- ①部品の機能的障害：素子が正常な動作を行わなくなり、熱暴走などの不具合に至る。
- ②部品寿命の低下：電子部品の故障率が增大し、装置寿命を縮める。
- ③機械的障害：熱応力や熱膨張により機械部品にダメージを与え、誤動作を招く。
- ④化学変化の促進による障害：化学変化により特性が劣化し、不具合に至る。
- ⑤人に対する障害：使用者にやけどを負わせたり、不快感を与えたりする。

電子機器の熱問題を解決するには、設計段階からの対策が不可欠であり、表 1.1 に示すように、そのレベルに応じた様々な熱対策が施されている。

表 1.1 低熱抵抗化策の分類[1]

低熱抵抗化策		部品レベル	プリント基板レベル	装置レベル
放熱面積の拡大	①放熱面積を拡大する	ヒートシンクの取り付け	ヒートスプレッドパターンの設置	筐体表面積拡大
	②伝導により熱を拡散する	部品材料や構造の改良、ヒートパイプの利用、TIM利用	配線パターンやサーマルビアへの伝導	筐体と部品の結合による熱伝導TIMの利用
熱伝導率の向上	③放熱面の風速を高める	部品局所冷却用ファンの設置、煙突効果の利用	風速の大きい場所への配慮	流路を狭め風速増大、通風口突入風速の利用
	④放熱面の放射率を高める	部品面黒色塗装、高放射率材料のコーティング	基板放射率向上、高放射率材料のコーティング	筐体内外面の塗装、高放射率材料のコーティング
	⑤熱伝達率の拡大	熱伝達率の大きい場所への配置、部品の千鳥配置、乱流促進体の利用、衝突冷却・・・		
周囲温度の低減	⑥換気風量の増大	—		通風口の拡大、換気ファン容量増大
	⑦周囲の高温部品からの断熱	遮蔽板の設置、ダクト等による排熱分離		
その他(特殊冷却)		冷凍機、蓄熱器、ペルチェ素子、液冷、蒸発冷却・・・		

これまでの熱対策は、前述した、熱伝導、対流、熱放射の3つの熱輸送の機構のうち、熱伝導、対流に主眼が置かれていた。例えば、半導体などの内部の電子部品から発生する熱エネルギーを、熱伝導率の高いアルミニウムや銅などの素材で作られた放熱板の内部を伝導させ、放熱板表面に伝わった熱エネルギーを冷却ファンなどで強制的に対流させる方法が一般的に使われている。しかし、製品の高性能化、小型化により製品の内部に物理的な放熱手段（放熱板、冷却ファン等）を設置するスペースの確保が難しくなっていること、また、製品の意匠面や経済性からも放熱フィンや冷却ファンのサイズ、設置場所は制限されつつあること、さらには、製品に使用される部品の微小化や部品点数の増加に伴い、微細な塵の影響を避けるための高度な密閉性が必要なこと、特に、携帯機器では IP（Ingress Protection）規格における 68 クラス（完全な防水構造で水面下での使用が可能）を満たす完全密閉の筐体が求められていること、などから、従来の熱対策方法では対応が難しくなっている。特に、完全密閉の閉鎖環境では、筐体内部の発熱体と熱を逃がすべき系外とが完全に遮断されており、対流による放熱効果は期待できない。

### 1.1.2 放熱の原理と手段

ここでは放熱の原理とその手段について述べる。熱源からの入熱に対して伝熱と放熱の現象は熱移動現象論（あるいはエネルギー輸送現象論）で説明される[2]。図 1.1 に伝熱解析の基本概念を一次元のモデルで示した。

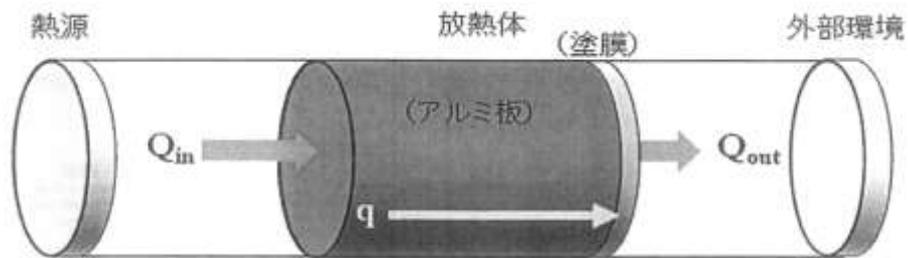


図 1.1 一次元伝熱モデルの模式図

放熱では特定の領域での入熱と出熱の収支が問題とされるが、基準単位面積当たりの長さ方向に対する一次元の熱の流れは、被放熱体に対する単位時間当たりの熱源から入熱する熱流束  $Q_{in}$  と、外部環境に出熱する熱流束  $Q_{out}$  のバランスと考えられる。 $Q_{in} - Q_{out} = 0$  の場合、入熱量と出熱量が一致するため、系内の温度変化はない。熱源の加熱開始後、十分な時間が経過した後の定常状態がこれに相当し、系内の温度は時間に依存しない。

$$Q_{in} - Q_{out} = \rho C_p V \Delta T \quad (1.1)$$

( $\rho$  : 密度,  $C_p$  : 比熱,  $V$  : 体積,  $\Delta T$  : 温度変化量)

一方、式(1.1)では、系内に単位時間当たりの  $\Delta T$  の温度変化が生じる。つまり、系内の温度は時間に依存し、 $Q_{out} > Q_{in}$  の場合に温度は低下する。よって、入熱

$Q_{in}$  よりも大きな出熱  $Q_{out}$  を得るための何らかの手段を講じ、定常状態に達するまでにこの系の温度が手段を講じる前よりも下がるようにすること、これがすなわち、放熱対策である。

熱は図 1.2 に示すように熱伝導、対流、熱放射のいずれかの手段で移動する[3]。熱エネルギーの移動は、熱伝導の場合、連続した、あるいは接触した物質間の格子振動（フォノン）または自由電子により行われ、対流の場合は、被放熱体の表面に気体や液体が接することでエネルギーが振動として伝達される。一方、熱放射の場合は、被放熱体と触れる媒体はなく、熱エネルギーは電磁波として系外に放出される。いずれにしても熱エネルギーの移動は高温領域から低温領域に向けて行われ、その放熱効果は、被放熱体と接触する媒体の温度や媒体内の温度勾配などに依存する。

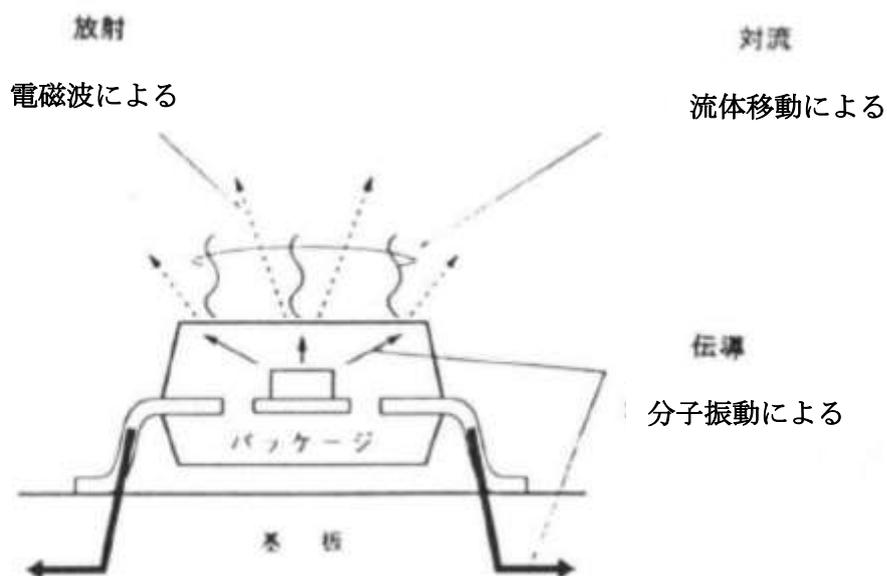


図 1.2 パッケージの放熱の様子[3]

図 1.1 に示した一次元モデルにおける  $Q_{in}$  と  $Q_{out}$  と、系内部の熱流束  $q$  により移動する熱量  $Q$  は、それぞれの熱移動の機構により、以下の各法則の式(1.2)～(1.4)で計算される。

$$\text{フーリエの法則 (熱伝導)} \quad Q/A_0 = -kdT/dx \quad (1.2)$$

$$\text{ニュートンの冷却法則 (対流)} \quad Q/A_0 = h(T-T_{external}) \quad (1.3)$$

$$\text{ステファン-ボルツマンの法則 (熱放射)} \quad Q/A_0 = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{external}^4) \quad (1.4)$$

( $k$ : 熱伝導率,  $h$ : 熱伝達係数,  $\varepsilon$ : 放射率,  $\sigma$ : ステファン-ボルツマン係数,  $T$ : 温度)

$Q_{out}$  で移動する熱エネルギー  $Q$  が大きいことが高い放熱性を意味することから、各機構においてそれぞれ、熱伝導率  $k$ 、熱伝達係数  $h$ 、放射率  $\varepsilon$  を大きくすることが熱エネルギー  $Q$  を大きくすることであり、高い放熱性を得ることである。すなわち、入熱の熱流束  $Q_{in}$  に対して、出熱 (能力) の熱流束  $Q_{out}$  が十分に大きくなる熱物性を持つことが良好な放熱体の条件であるといえよう。さらに非定常状態を考慮するならば、放熱体内の温度変化がなるべく小さくなるよう、その内部での十分な熱移動能力  $q$  を備える必要がある。

系全体の温度を下げるという観点から考えると、熱エネルギーは系外に放出される必要がある。熱伝導では、非常に高い熱伝導率を有する物質によって短時間で大きな熱容量を持ったヒートシンクに熱エネルギーを移動したとしても、最終的には対流または放射によって系外に放出しなければ、系全体の温度が下がることはない。このため、携帯機器や LED などの小型の電気・電子機器では、熱伝導、対流、熱放射の 3 つの機構を合わせた放熱設計が必要となる。

### 1.1.3 熱放射による熱移動

熱放射による放熱の特徴は、直接接している環境温度が非放熱体よりも高くても、熱を系外に逃がすことができることである。例えば、放射冷却現象は、地面の熱エネルギーが電磁波として宇宙空間に放出されるため、外気温が  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上でも地面が凍結する現象がみられる。その冷却効果は非常に大きく、砂漠などでは外気温に対して  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  あまり低下させることもでき[4]、また昨今、熱放射と熱線反射を組み合わせたモジュールを日中の太陽光の当たる場所に置くことにより、外気温に対して大幅に内部の温度を下げる技術も報告されている[5]。この技術の適用例として、ビルの外壁にモジュールを設置することでエアコンの消費エネルギーを削減することが期待されている。

図 1.3 に放熱フィンを用いた対流と、放熱性塗膜による熱放射での放熱過程を模式的に示す[6]。

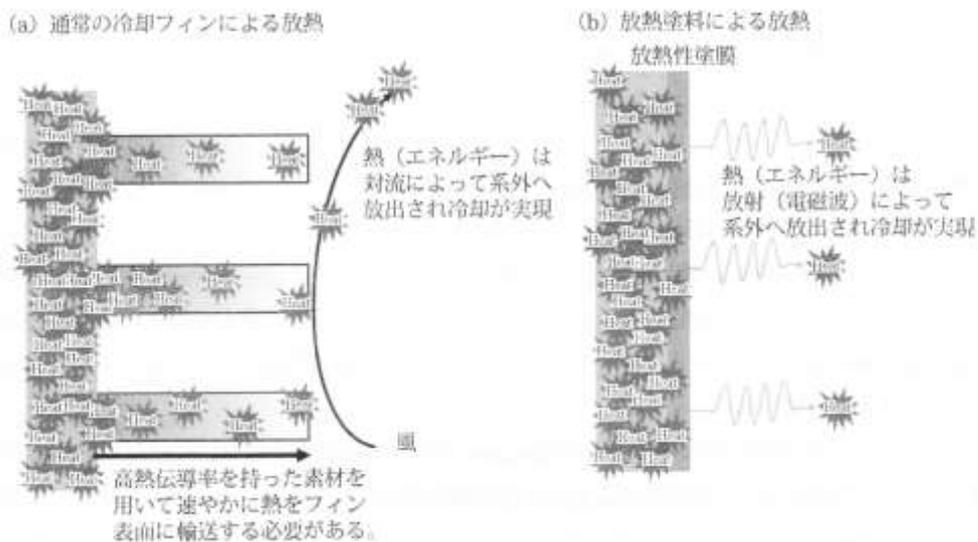


図 1.3 冷却フィンを用いた対流と放熱性塗膜による熱放射での放熱過程の違い

対流では媒体（この図では風）に接触して熱エネルギーは系外に放出される。風と接触する表面積が大きいほど放熱効果は高く、フィン状の構造で表面積を大きくすることで放熱効果を高める手法がとられる。一方、内部の熱エネルギーは、できる限り早く媒体に接している最表面に移動させる必要があり、熱伝導率の大きいアルミニウム ( $k=237 \text{ W/mK}$ ) や銅 ( $k=390 \text{ W/mK}$ ) などの素材がフィンの材質として使用される。また、フィンの最表面から熱エネルギーを受け渡された媒体を、冷却ファンなどで強制的に系外に排出する手法も効果的である。その際の熱伝達係数は自然対流の場合の 3~5 倍に上昇し、放熱効果は増大する。対流による熱移動に対して熱放射では、熱エネルギーは電磁波として系外に放出されるので、対流による放熱効果が期待できない密閉系でも冷却効果を発揮する[6]。さらに対流が加われば、2つの機構により放熱効果が高まる。

通常、熱エネルギーを迅速に最表面に移動させるためには、使用する材料の熱伝導率が高いことが有利であるが、本研究で検討する放熱材料は、塗布した際の膜厚が非常に薄いため、材料自体の熱伝導率の影響は少ない。例えば、 $100^\circ\text{C}$  程度の放熱では、熱伝導率の低い樹脂素材 ( $k=0.1\sim 0.3 \text{ W/mK}$  程度) であっても短時間で十分な熱エネルギーを最表面に移動させることが可能と考える。

## 1.2 本研究の目的

1.1の冒頭で述べたとおり、昨今の電気・電子機器は小型化と高性能化が進み、機器の電力密度（単位体積あたりの消費電力）や部品の発熱密度（単位表面積当たりの発熱量）が増大していることから熱対策が必須であり、熱伝導、対流、熱放射の3つの熱輸送の機構を総合的に活用するサーマルマネジメントが重要視されている。この中で熱放射については、その効果が被放熱体の温度に大きく依存するため、低温度領域では効果が低いと考えられており、100℃以下の放熱が必要とされる一般的な電気・電子機器ではほとんど活用されていなかった。

しかし、熱放射は、空間的に絶縁された状態でも電磁波によって熱を系外に放出できること、特別な機構や部品、追加のエネルギーを要せず、対象物の表面に薄膜を形成するのみで放熱の効果が得られることなどの利点もあり、100℃以下で効率的に熱放射できる放熱塗料ができれば、様々な分野での活用が可能と考えた。よって本研究では、電気・電子機器で必要とされる100℃程度の温度域における熱放射を効率的に行う放熱塗料を開発し、その効果についての検証を行うことを目的とした。

電気・電子機器以外に100℃程度の放熱が必要とされる設備として、太陽光発電が挙げられる。太陽光発電では、モジュールの温度上昇が変換効率低下のひとつの原因となっている。温度上昇を抑える手段として、特別な機構や部品、追加のエネルギーを必要としない、表面に薄膜を形成するのみで放熱の効果が得られる放熱塗料が有効であると考えた。本研究では、太陽光発電における放熱塗料の効果についても検証を行う。

### 1.3 本論文の構成

本論文は 5 章で構成され、第 1 章では序論として電子機器の熱対策と放熱の原理、熱放射の有用性について述べた。

第 2 章では、100 °C 以下で放熱効果を発揮する放熱塗料の設計について述べる。加熱された物体は電磁波を発生して、より低温の外部環境に熱放射を行うが、その温度によって放射される電磁波の波長は異なる。すなわち、高い放熱性能を得るためには、放熱対象温度（100 °C 以下）で発生する電磁波の波長付近で高い放射率（吸収率）を有する物質を選択することが重要である。一方、無機粒子の熱放射特性は物質固有のものであるが、同一波長においては物質の放射率と吸収率は等しいというキルヒホッフの法則から、その赤外吸収能を比較することで放熱性能の高い無機粒子を選定することができる。本研究では赤外吸収域の異なるフッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ )、熱分解窒化ホウ素 (p-BN)、炭化ケイ素 ( $\text{SiC}$ ) を選定し、各々をアクリル樹脂で塗料化してその放熱性能を比較した。

第 3 章では、シリコン太陽電池モジュールでの放熱塗料の効果検証について述べる。放熱塗料をバックシートに塗布することで、発電時の太陽電池モジュールの温度を下げ、変換効率の低下を軽減することを目的とした。

第 4 章では、さらに放熱性能を向上させるために塗膜表面の熱伝達性と塗料自体の熱伝導率を高めた放熱塗料について述べる。特に屋外での有風時を想定し、風洞実験により効果の検証を行った。

第 5 章では第 2 章から第 4 章の研究結果を総括する。

## 1.4 引用文献

- [1] 国峯尚樹 (2005) 放熱を考えた実装技術. MATERIAL STAGE 4: 1-7
- [2] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN, *Transport Phenomena* (John Wiley & Sons, Inc.,1960)
- [3] Masaru Ishizuka (1997) Thermal Design of Electronic Equipment. J J Weld Soc 7: 20
- [4] Granqvist CG, Hjortsberg A (1981) Radiation cooling to low temperature : general considerations and application to selectively emitting SiO films. J Appl Phys 52: 4205-4220.
- [5] Ramen AP, Anoma MA, Zhu L et al. (2014) Passive radiation cooling below ambient air temperature under direct sunlight. Nature 515: 540-544.
- [6] 岩村栄治, 両角靖孝「放熱塗料の配合設計と基材との密着性, 耐候性の向上」  
放熱・高耐熱材料の特性向上と熱対策技術 (技術情報協会, 2017)

## 第2章 放熱塗料の設計

### 2.1 諸言

半導体デバイスや LED、リチウムイオン電池、太陽電池などの電子機器、設備において、機器の寿命あるいは信頼性の観点から、発生した熱を効果的に逃がすことが重要視されている[1-5]。昨今のマイクロプロセッサに代表されるように、高機能化と小型化が進むと消費電力も増大し、さらに機器の発熱も大きくなっている。それゆえに電子機器内部に蓄積される熱エネルギーを外部に放出する必要がある。単純な熱移動から相転移をする物質による熱貯蔵まで、これまで様々なサーマルマネジメントが提案されているが[6-9]、多くの電子機器に必要とされる 373K (100 °C) 以下の領域での熱対策は、低コストで実用的である熱伝導、対流、熱放射を利用したシンプルな機構が有効とされている。

従来熱対策は、熱伝導と対流に主眼が置かれてきた。熱伝導は熱源から熱エネルギーをヒートシンクや外表面に移動させる手段として利用されるが、使用する材料の熱伝導率が最も重要なファクターであり、比較的安価で熱伝導率の高い Al あるいは Cu が一般的に使用されている[10]。また近年は、熱伝導率において大きな異方性を有するシート状に形成されたグラファイトや、六方晶窒化ホウ素 (h-BN) もヒートスプレッダーとして使用されている[11-14]。また、ダイヤモンドやカーボンナノチューブ、グラフェンなどの炭素系物質は熱伝導率が非常に高く、さらに軽量、高耐久性などの特徴を有するため、新しいヒートスプレッダー素材として注目されている[15-21]。

ヒートスプレッダーを介して移動された熱エネルギーは、最終的に何らかの手段で外表面から大気に放出されなければならない。その際、外表面の熱伝達係

数と表面粗さが対流による冷却効果を左右する重要な因子となる。放熱フィンなどにより表面積を大きくし、熱伝達係数を上げるために電動ファンを用いて強制的に対流を起こすことがこれまで電子機器に採られてきた一般的な方法だが[22]、携帯機器など小型化が進むにつれ、従来のヒートスプレッダーや放熱フィン、電動ファンなどを機器の内部に設置することが難しくなってきた。さらに、内部の電子部品もより密集化しており、わずかな埃でも誤動作の原因となりうるため、外部環境を完全に遮断する密閉構造も要求されている。

熱放射は熱伝導、対流に次ぐ第 3 の熱移動の手段だが、電子機器に必要とされる 373K (100°C) 以下の領域での熱対策にはほとんど活用されていなかった。その理由は、熱放射におけるエネルギー流束は温度の 4 乗に比例する (ステファン-ボルツマンの法則) ことから、比較的低い温度領域では大きな効果が得られないと考えられてきたことによる。しかし、晴れた冬の日放射冷却現象が起こるように、選択的に赤外域での放射を高めることにより、環境温度以下に冷却できる例も報告されている[23-27]。また、最近の研究では、直射日光の下で、熱放射層と熱線反射層を設けた多層コーティングにより効果的に温度を下げる方法も報告されている[28-30]。さらに、熱放射を最適化した放熱塗料を塗布することにより、集光型太陽電池 (CPV) モジュールの温度が 10 K 下がった例も報告されている[31]。セルの温度が 10 K 下がることにより、変換効率は 0.5 % (21.5 %→22.0 %) 向上している。

第 2 章では、熱放射を担う無機粒子に着目し、効率的に熱放射を行う放熱塗料を設計するための検討を行った。放熱塗料は、熱エネルギーを吸収あるいは放射する無機フィラーと、基材に無機フィラーを固着させ薄膜を形成する樹脂で構成される。これまで、熱伝導率と熱放射の観点から様々な無機フィラーと樹脂の組み合わせが検討されており[32-37]、放射率は放射冷却において最も考慮す

べき因子であるが、物質の構造によって異なる赤外域での吸収あるいは放射にも着目すべきであると考えた。すなわち、各々の熱放射性物質の特性とその放射冷却能力の関係を解明することが、より効果的に熱放射を行う放熱塗料の設計には不可欠である。本研究では、赤外域に特徴的な吸収能あるいは放射能を有するフッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ )、熱分解窒化ホウ素 (p-BN)、炭化ケイ素 (SiC) を無機フィラーとして選定、これらの無機フィラーを樹脂により塗料化し、Al 板の表面に塗布することで膜を形成、310~410 K (37~137°C) での熱放射特性について比較した。

## 2.2 実験方法

バインダーとなる樹脂成分と、赤外領域に吸収を持つ無機フィラーを容器に入れ、無機フィラーの凝集体がなくなるまで攪拌混合した。次に、この混合物に有機溶剤を加え、500 mPa・s 以下の低粘度のスラリーを得た。さらにホモジナイザーを用いて、スラリーを均一化した。

表 2.1 にテストサンプルの組成を示す。バインダーとして添加しているアクリル樹脂には、硬化剤成分として 5 wt.%以下のメラミン樹脂を含む。無機粒子はそれぞれが持つ赤外領域の放射特性により選択した。固体表面における吸収率と放射率は放射が平衡状態にある場合、同一温度下では等価であるというキルヒホッフの法則に基づき、本研究ではフーリエ変換赤外分光計（FT-IR：AVATAR360, UMA150 サーモフィッシャーサイエンティフィック社製）で測定した赤外吸収＝放射性能としている。フッ化カルシウム（CaF<sub>2</sub>）、熱分解窒化ホウ素（p-BN）および炭化ケイ素（SiC）は、それぞれ 9.4 μm、7.3 μm と 10 μm 以上の領域で、強い赤外放射特性を示した。スラリーは 50 mm×120 mm、2 mm の未処理のアルミ板（A-1050P）の片面にスプレー塗布し、オーブンで加熱硬化（165 °C×20 分）させることにより放熱塗膜を形成した。

表 2.1 テストサンプルの組成

Sample No.	Heat Dissipation Filler	Binder (Acrylic Resin)	Xylene Solvent
A	nil	48.0 Vol.%	52.0 Vol.%
B	CaF <sub>2</sub> (18.9 Vol.%)	20.5 Vol.%	60.6 Vol.%
C	p-BN (27.1 Vol.%)	28.0 Vol.%	44.9 Vol.%
D	SiC (26.5 Vol.%)	26.5 Vol.%	47.0 Vol.%

放熱塗膜の微細構造、表面粗さ、熱放射率は、それぞれ走査型電子顕微鏡 (SEM)、共焦点レーザー顕微鏡、サーモグラフィーにより測定した。硬化後の放熱塗膜の厚みは  $40\ \mu\text{m}$  である。

図 2.1 に塗膜の熱放射の効果を評価するために用いた装置を示す。この装置は実際の電子機器の内部で発生する熱を模している。熱源はシャント抵抗器 (PBH1ΩD : PNC,INC 製) を用い、Al 基材の裏面 (放熱塗膜のない面) 中央に熱伝導性の接着剤とネジで固定した。試験素子は断熱材で構成されたフレームに固定され、そのフレームを密閉されたガラス製の箱で覆っている。ガラス箱の内側には測定系内への外部からの輻射熱流入を防ぐため、吸熱材としてカーボンシートを貼った。カーボンシートは外部からの流入熱を吸収するほか、測定系内で熱源より発生するエネルギーを吸収するヒートシンクの役割も担い、吸収した熱を系外へと放出する。このような構成により、本研究の評価装置は外部の熱流入がほとんどない環境を保っていることから、装置外部からの要因は除外し、系内の条件のみを考慮すればよい。実際に、境界にあるカーボンシートの温度 ( $T_{\text{carbon}}$ ) と、系内の雰囲気温度 ( $T_{\text{ambient}}$ ) は、定常状態において同温度に保たれていたことから、本実験は外部環境の影響をほとんど受けない状態で行われたと考える。

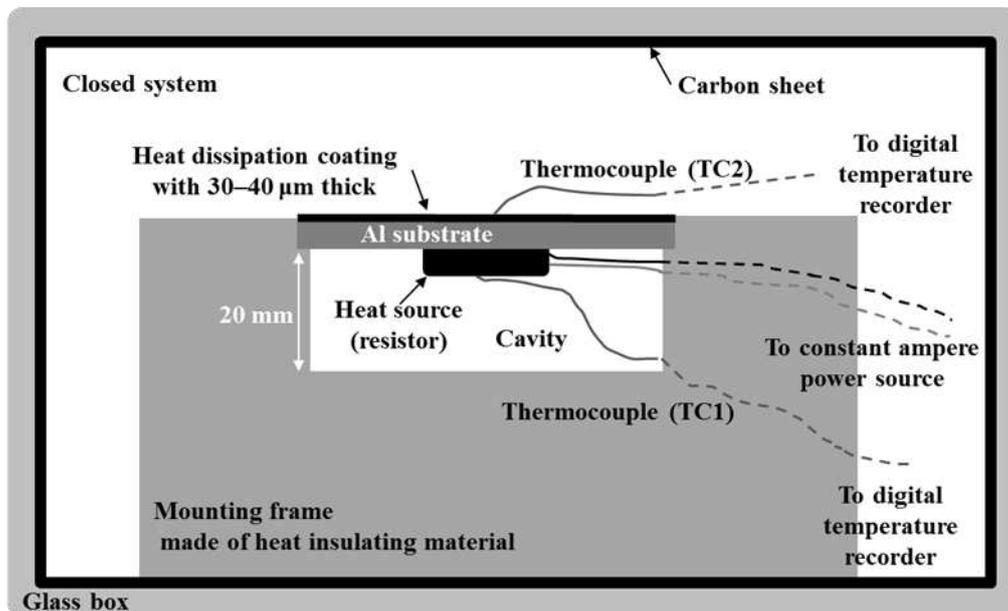


図 2.1 放熱塗料の評価装置

熱源となる抵抗器には定電流電源により一定の電流を流した。供給する電流と電圧はそれぞれ 1.5~3.2 A、0.5~1.8 V である。この電力条件により、未塗装のアルミ基板の表面温度は、310K (37°C) から 400 K (127°C) にコントロールされる。熱電対を抵抗器の表面に取り付け、抵抗器に一定の電流負荷をかけたのち、2 時間後を定常状態としてその時点の温度を測定値とした。測定時の環境条件は 293~295 K (20~22 °C)、45 %RH である。一定の電流をかけた状態で熱源の表面温度が徐々に上昇し、2 時間後にほぼ定常状態になる様子を図 2.2 に示す。

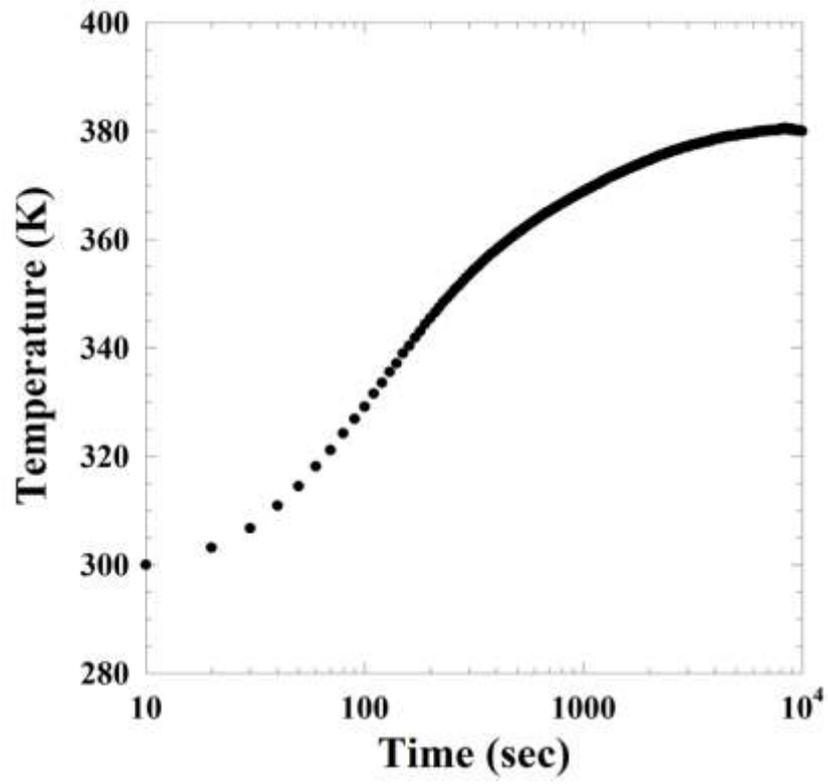


図 2.2 一定電流負荷時の抵抗器表面温度の経時変化

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 放熱塗料の選択的赤外放射特性

図 2.3 は赤外線放射フィラーとして  $\text{CaF}_2$  を含んだ放熱塗膜断面の SEM 写真である。およそ  $20\ \mu\text{m}$  の  $\text{CaF}_2$  フィラーが膜内に分散されている。塗膜はほぼフィラーで満たされており、バインダーである樹脂成分の体積比率はほぼ 50 Vol.% である。塗膜表面の粗さは膜厚やフィラーの粒径、含有率に依存する。フィラーを含まない樹脂膜の表面は平滑で、表面積は Al 基材の公称面積とほぼ等しいと考えてよいが、 $\text{CaF}_2$  フィラーを加えると塗膜の表面積は Al 基材の 3~4 倍に拡大する。

サーモグラフィーにより測定される放射率は、元の未塗装の Al 表面で 0.3 以下、フィラーを含まない樹脂のみの塗膜の場合は 0.89 まで上昇するが、 $\text{CaF}_2$  フィラーを含む塗膜では、さらに 0.97 まで上昇する。

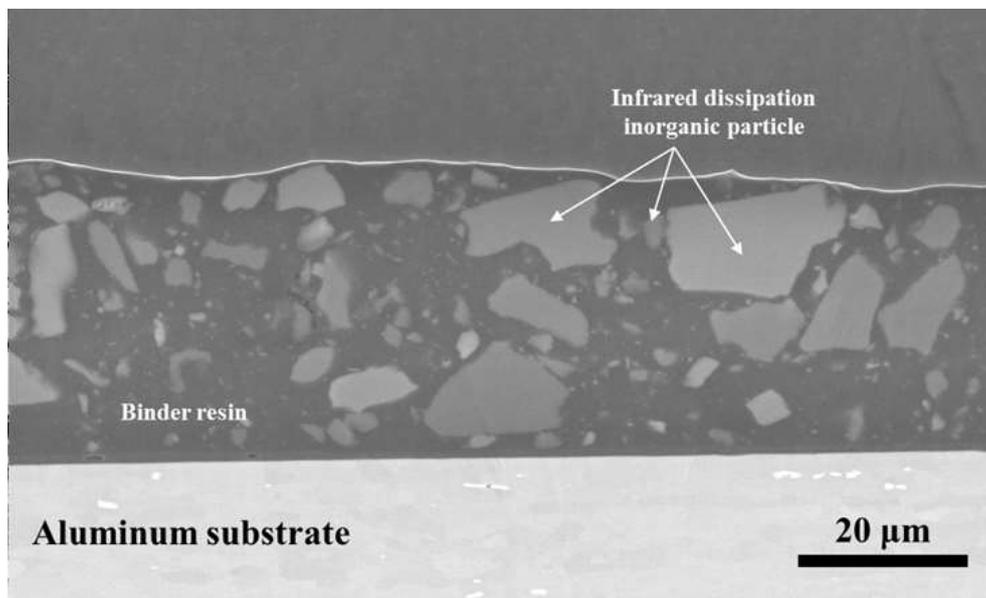


図 2.3 Al 基材に塗布した  $\text{CaF}_2$  を含有する放熱塗膜の断面 SEM 写真

図 2.4 は、CaF<sub>2</sub> 粒子とアクリル樹脂の赤外線放射の強さと波長の関係を表したものである。CaF<sub>2</sub> は 8.2~11.5 μm の波長に強い放射能を有することが観測され、最大ピークは 9.4 μm で 70% の強度を示している。さらに、13.0~13.5 μm の波長にも 40% 程度のピークが存在するが、8 μm 以下の領域では、ほとんど放射能を有しない。一方、アクリル樹脂の赤外線放射は CaF<sub>2</sub> に比べて極めて小さい。

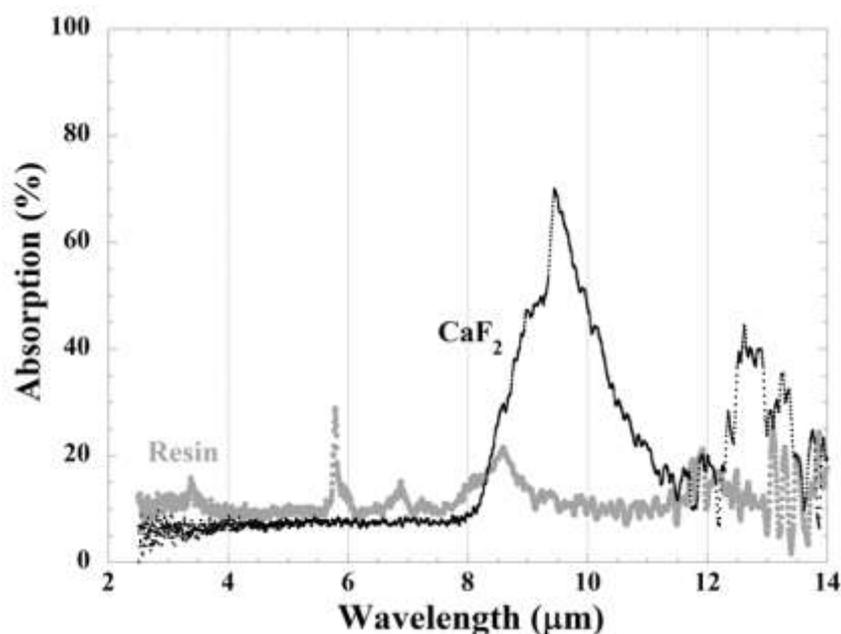


図 2.4 CaF<sub>2</sub> 粒子とアクリル樹脂の赤外スペクトル

図 2.5 に p-BN 粒子と SiC 粒子の赤外放射の強さと波長の関係を示した。これらの粒子は CaF<sub>2</sub> とは異なる特徴的な赤外線放射プロファイルを有する。p-BN は 6.2~8.0 μm の領域に、強く鋭い赤外線放射ピークが存在し、7.3 μm での強度は 90% に達する。加えて、12.1~13.2 μm の領域にも 35% 程度の強度のピークが測定された。8.0 μm 以下の領域で選択的に強い赤外線放射能を有する物質は極めて少ない。一方、SiC は 10 μm 以下の領域に特徴的な放射は見られず、10.3 μm

以上の領域に2つのピークが見られた。ピークは12  $\mu\text{m}$  と13.0  $\mu\text{m}$  で、放射強度はそれぞれ58%と90%であった。

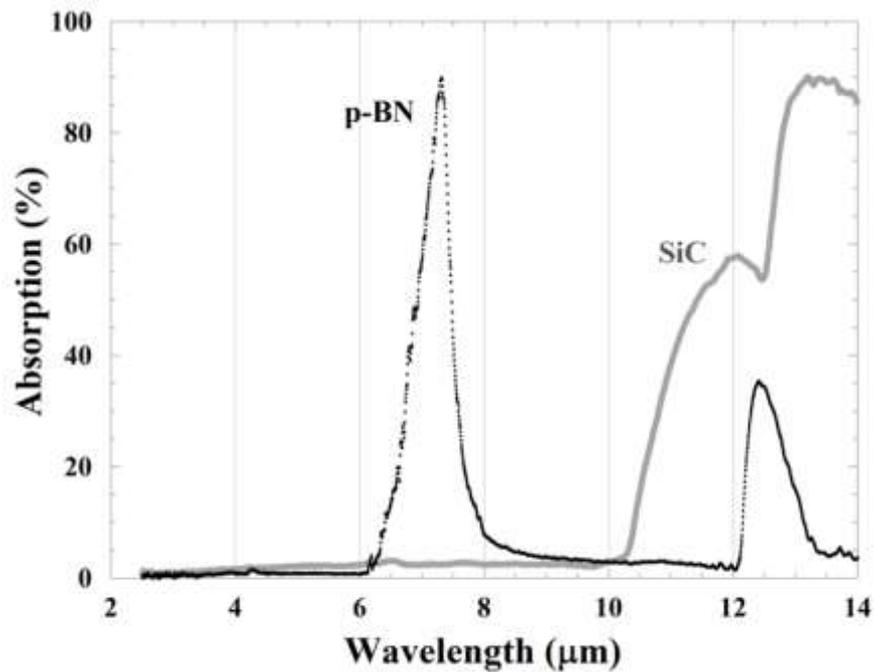


図 2.5 p-BN 粒子と SiC 粒子の赤外スペクトル

図 2.6 に電流と抵抗器表面温度の関係を示す。●が未塗装、○がフィラーを含まない樹脂のみの塗膜、■が  $\text{CaF}_2$  粒子を含む塗膜、◆が p-BN 粒子を含む塗膜、▲が SiC を含む塗膜の温度を表しており、電流負荷を変化させて測定した。

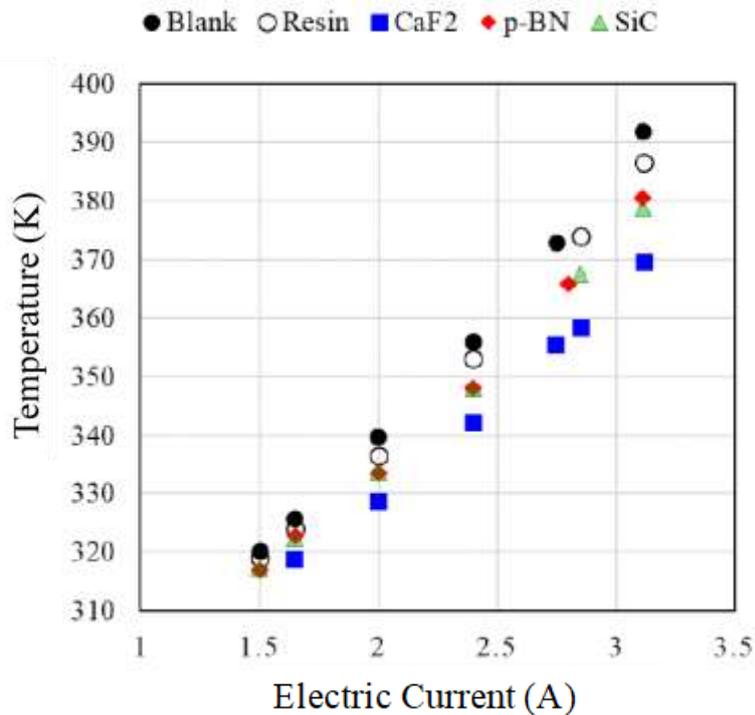


図 2.6 未塗装および各種塗料を塗布した Al 板の温度比較

電流の増加に伴い、抵抗器の表面温度は直線的に増加した。熱放射性のフィラーを含む放熱塗膜の効果は、高電流を流した際の高い温度で顕著に表われている。最も大きな温度低下の効果が得られたのは  $\text{CaF}_2$  を含む塗膜で、例えば、2.75 A の電流時に、未塗装の Al 基材の抵抗器の表面温度が 372.9 K まで上昇したのに対して、 $\text{CaF}_2$  塗膜を有する Al 基材の抵抗器の温度は 355.5 K に抑えられ 17.4 K の温度低下の効果が得られた。さらに電流を 3.11 A まで上げると、温度差は 22.2 K まで拡大した。放熱フィラーとして p-BN、SiC を含む塗膜では、未塗装あるいは放熱フィラーを含まない樹脂のみの塗膜と比較すると温度低下の効果はあったものの、 $\text{CaF}_2$  に比べるとその効果は低かった。p-BN と SiC の放熱性能はほぼ同等で、温度低下の効果は 1.65 A の時に 3 K、2.75 A の際には 8 K であった。

### 2.3.2 放熱塗料の冷却効果

抵抗器で発生する熱エネルギーの大部分は熱伝導により AI 基材に移動し、さらに樹脂塗膜へと移動する。樹脂表面に移動した熱エネルギーは、輻射と対流により系外に放出される。図 2.1 で示したように、抵抗器自体は断熱材で覆われた閉空間に置かれており、対流による放熱は期待できない。その理由は、対流による熱移動は基材表面とそれに接する空気の温度差、および熱伝達係数に依存することによる。

図 2.7 に放熱塗膜から放射される総熱流 ( $Q_{\text{total}}$ )、対流による熱流 ( $Q_{\text{convection}}$ )、輻射による熱流 ( $Q_{\text{radiation}}$ ) の関係を示す。これらの関係は以下の式(2.1)により、それぞれの温度における  $Q_{\text{convection}}$  と  $Q_{\text{radiation}}$  を計算することにより導かれる。

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{convection}} + Q_{\text{radiation}} = a\{h(T - T_{\text{carbon}}) + f \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma(T^4 - T_{\text{carbon}}^4)\} \quad (2.1)$$

$a, h, T, T_{\text{carbon}}, f, \varepsilon_f, \sigma$  はそれぞれ表面粗さ係数、熱伝達係数、熱源温度、カーボンシートの温度（本研究では環境温度に相当）、形態係数、放熱塗膜の放射率、ステファン-ボルツマン係数  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  を表す。

$a = 5, h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, T_{\text{carbon}} = 294 \text{ K}, \varepsilon_f = 0.9$  とすると、 $Q_{\text{radiation}}$  と  $Q_{\text{convection}}$  は  $423 \text{ K}$  でほぼ等価となる[38]。測定装置外から流入する熱エネルギーは、放熱塗膜表面から放出される熱エネルギーに比べて極めて小さいため、 $f = 1$  と近似した。 $423 \text{ K}$  以下の比較的低い温度領域では、対流に比べて輻射の効果は低いが、密閉空間での熱対策などで対流の効果が十分に得られない場合には、輻射の効果が期待できる。

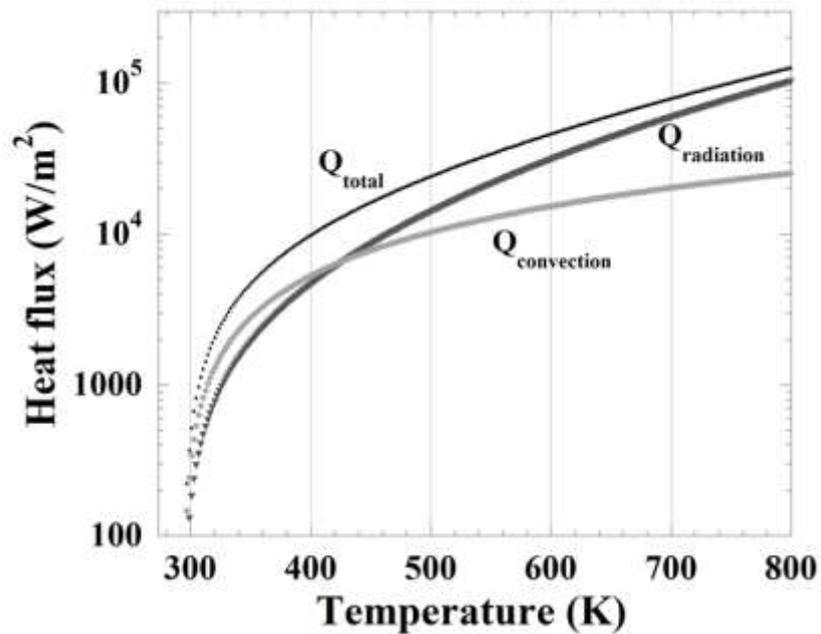


図 2.7 各温度における輻射による熱流束と対流による熱流束の大きさ

抵抗器表面の温度の違いは、塗膜に含まれるそれぞれの無機フィラーの特性に依存しており、無機フィラーの赤外領域での熱放射特性が効果的な冷却に寄与している。図 2.8 にウィーンの変位則より導かれた、温度 ( $T$ ) とその温度での最大放射強度を示す波長 ( $\lambda_{\max}$ ) の関係を表すグラフを掲げた。また、式(2.2)にウィーンの変位則の関係式を示す。

$$\lambda_{\max} = \frac{0.002898}{T} \quad (2.2)$$

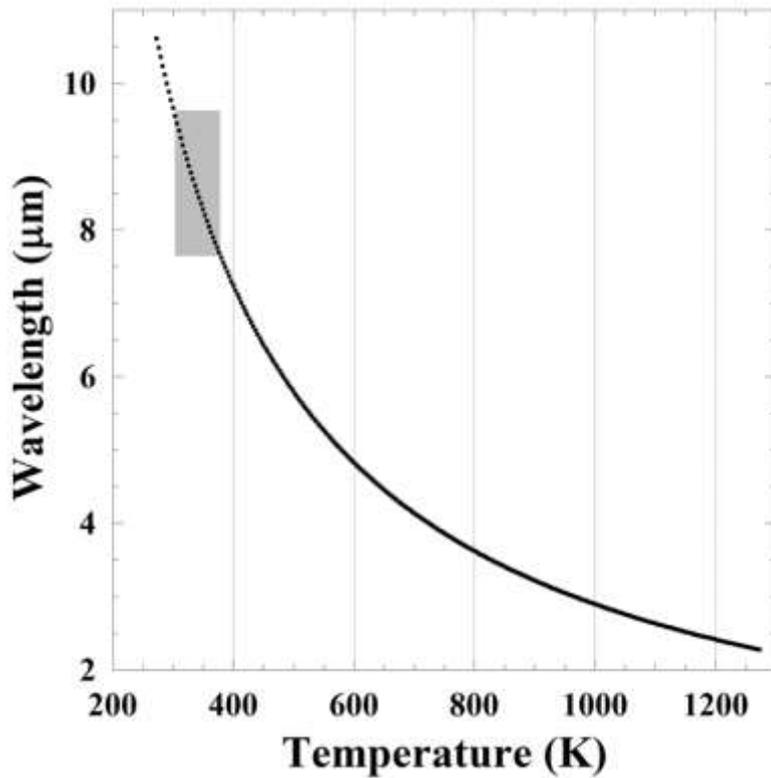


図 2.8 温度 ( $T$ ) とその温度での最大放射強度を示す波長 ( $\lambda_{\max}$ ) の関係

プランクの放射則に従うと、それぞれの温度には放射エネルギー密度の最大強度を有する特定の波長が存在する。よって、冷却すべき物体の温度を下げるために熱エネルギーを効率的に放散させるには、その温度に合った赤外線放射特性を有する材料を選択しなければならない。

図 2.8 の灰色で示す領域は、本研究でターゲットとする温度と波長の範囲を表している。固体物質の放射率と吸収率は等価であるため、373 K でおおよそ  $7.8 \mu\text{m}$ 、313 K で  $9.3 \mu\text{m}$  の特定の赤外線吸収能を有する物質が、必要とされる温度域で適切な放射効果が得られる物質である。ゆえに、 $9.4 \mu\text{m}$  をピークとして  $8.2 \sim 11.5 \mu\text{m}$  の波長域に広い熱放射特性を持つ  $\text{CaF}_2$  は、373 K 以下の低い温度域での放熱に適した物質であるといえよう。一方、p-BN および SiC は、 $8 \sim 10.3 \mu\text{m}$  に明確

な吸収ピークはなく、本研究で必要とする温度域での放熱には適さない。バインダー成分として使用するアクリル樹脂自身も若干の放射特性を有するが、必要とされる低温領域での熱放射特性は低く、その寄与は小さい。

カーボンブラックは波長全域に渡って高い放射特性を有するが、同時に周囲からの熱も吸収する。カーボンブラックは周囲に他の熱源がない場合は最も効果的な放熱材料であるが、電子機器の内部のように、様々な温度域で熱を発する部品が共存する場合は他の部品から放出した熱も吸収するため、特定の温度域で選択的に熱放射特性を有する物質のほうが有利である。さらに、カーボンブラックをフィラーとして分散させた放熱塗料は黒色、 $\text{CaF}_2$ の場合は白色になるが、太陽光モジュールへの適用において、カーボンブラックを含む黒色の塗膜は、セラミックタイプの白い塗膜と比較して熱低減効果が低いとの報告もある[39]。これは外部環境からの光吸収の影響であるといわれている。発熱体表面の温度範囲に応じて、その温度に適した選択的熱放射特性を有する放熱塗料を使用することにより、熱源の熱を放出しつつ、周囲からの熱吸収を抑制して効果的に熱源の温度を下げる事が可能であると考えられる。

電子デバイスを長寿命化するには、動作温度を下げることが効果的である。図 2.6 に示したように、無機粒子を含む樹脂塗膜を有する抵抗器の表面温度は、無機粒子を含まない樹脂塗膜や、塗膜なしの Al 基材と比較して大きな温度低下の効果があつた。これらの結果は、輻射の機能を利用した放熱塗料が電子機器内部の発熱部品を効果的に冷却し、機器自体の寿命を延ばす働きを示唆している。特に対流の効果が乏しい密閉空間での活用が期待できる。

### 2.3.3 放熱塗料の材料設計

キルヒホッフの法則によると、塗膜中に複数の等価な赤外線放射特性を有する物質が共存する場合、1つの物質から放出される電磁波は、他の物質によって吸収される。よって、塗膜に含まれる熱放射物質の体積よりも、2次元の有効表面積が重要な因子となる。これは、フィラーの高充填よりも、それぞれ赤外吸収の波長域が異なる複数の物質の共存が効果的であることを示唆している。

放熱塗料の充填材料（フィラー）の選択については、冷却対象物の温度に対応した波長と、その波長における選択的な赤外線放射性能が重要であり、電子機器に必要とされる 373 K 以下の温度域では  $\text{CaF}_2$  が有効である。一方、 $\text{CaF}_2$  よりも短波長域に強い赤外線放射特性を有する p-BN は 273 K よりも高温の環境で、高波長域に強い放射特性を持つ SiC は 213 K よりも低い温度環境で冷却能力を発揮すると考えられる。

以下に今回設計した放熱塗料（フィラー： $\text{CaF}_2$ 、バインダー：アクリル樹脂）の耐久性について記す。実施した試験は、高温高湿試験（423 K, 3000 時間）、塩水噴霧試験（JIS5600 7-1, 240 時間）、光照射試験（100 W/m<sup>2</sup>, 333 K, 65 %RH, 5000 時間）、高温高湿試験（358 K, 85 %RH）、熱サイクル試験（233 K $\leftrightarrow$ 393 K, 30 分毎, 6000 サイクル）である。試験には Al 基材に放熱塗料を塗布し加熱硬化したものをを用いた。

表 2.2 は未塗装の Al 基材を備えた熱源の温度（353 K）と放熱塗装を施した際と同電流負荷での熱源温度の温度差を表している。試験前の温度差 ( $\Delta T_1$ ) が -12.0 K であったのに対して、各試験後の温度差も -12 K 前後を維持しており、試験後の放熱性能劣化はなかった。

表 2.2 各種対候性試験後の放熱効果

	Before test	After high temperature test	After salt spray test	After light irradiation test	After high temperature high humidity test	After heat cycle test
$\Delta T_1$ (K)	-12.0	-12.2	-12.0	-12.1	-11.8	-11.9

また、屋外での使用を想定して、表面に塵埃が付着した際の性能低下について検証した。CaF<sub>2</sub>を含む放熱塗膜の上に泥水を付着させ、オーブンにて乾燥した。泥の厚みは約 1 mm で、図 2.9 に示すようにまだらに付着している。

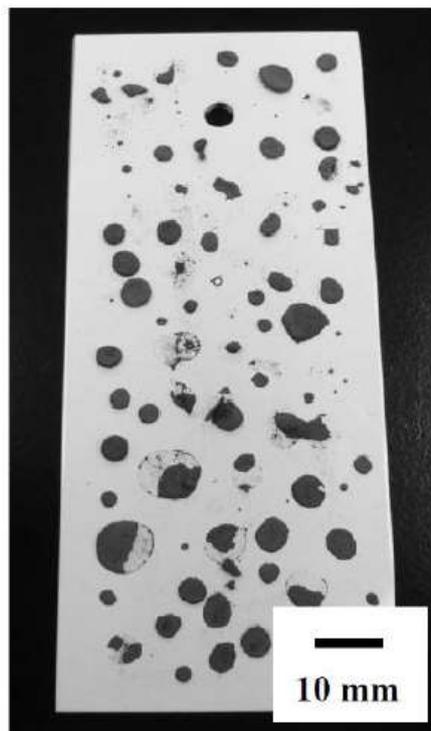


図 2.9 泥付着後の試験サンプル

各種耐久試験と同様の方法で、泥の付着前後の 353 K における放熱性能を比較した。表 2.3 に結果を示す。

表 2.3 泥付着時の放熱性能

	Without mud	With mud
$\Delta T_2$ (K)	-11.8	-11.7

泥の付着有無にかかわらず、放熱性能の変化はなかった。これは、放熱塗膜の赤外線放射波長と泥の吸収波長が異なるため、泥が塗膜からの熱放射を妨げなかったと推測される。対流による放熱では、物質の熱伝導率と表面の熱伝達係数が重要なファクターとなるため、厚さ 1 mm の泥の付着は放熱性能に大きな影響を及ぼすと考えられる。

## 2.4 結言

赤外線放射特性を有する無機フィラーを含む放熱塗膜の冷却効果を 310~400 K の温度範囲で調べた。未塗装の Al 基材と比較して Al 基材表面に  $\text{CaF}_2$  を含む塗膜を備えた熱源の温度は、未塗装 373 K に対して 17 K の顕著な冷却効果が見られた。冷却効果は、FT-IR の測定で示される各々の無機フィラーの特徴的な赤外吸収スペクトルに依存する。 $\text{CaF}_2$  粒子は  $9.4 \mu\text{m}$  をピークとする  $8.2\sim 11.5 \mu\text{m}$  の波長域に特徴的な赤外吸収特性を有し、特に電子機器の熱対策に重要とされる 373 K 以下の温度域の熱放射に寄与する。一方、 $8.0\sim 10.3 \mu\text{m}$  に明確な吸収ピークを持たない p-BN と SiC を含有する放熱塗膜は、400 K 以下の温度領域では  $\text{CaF}_2$  より放熱性能が劣る結果となった。いずれの塗膜も 0.94~0.96 の熱放射率を有するが、これは  $8\sim 14\mu\text{m}$  におけるエネルギー放射量から求められた値であり、特定の波長での放射率ではない。それぞれの温度には放射エネルギー密度の最大強度を有する特定の波長が存在するため、冷却対象物の温度に合わせて、その波長に顕著な吸収を持つ物質を放熱フィラーとして選択することが放熱塗料のキーポイントとなる。

## 2.5 引用文献

- [1] Chang MH, Das D, Varde PV, et al. (2012) Light emitting diodes reliability review. *Microelectron Reliab* 52: 762–782.
- [2] Jakhar S, Soni MS, Gakkhar N (2016) Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies. *Renew Sust Energ Rev* 60: 41–59.
- [3] Lall P, Pecht M, Hakim EB (1995) Characterization of functional relationship between temperature and microelectronic reliability. *Microelectron Reliab* 35: 377–402.
- [4] Meneghini M, Dal Lago M, Trivellin N, et al. (2012) Chip and package-related degradation of high power white LEDs. *Microelectron Reliab* 52: 804–812.
- [5] Zhao R, Zhang S, Liu J, et al. (2015) A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system. *J Power Sources* 299: 557–577.
- [6] Baby R, Balaji C (2012) Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *Int J Heat Mass Tran* 55: 1642–1649.
- [7] Goli P, Legedza S, Dhar A, et al. (2014) Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries. *J Power Sources* 248: 37–43.
- [8] Mills A, Farid M, Selman JR, et al. (2006) Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix. *Appl Therm Eng* 26: 1652–1661.
- [9] Tan FL, Tso CP (2004) Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Appl Therm Eng* 24: 159–169.
- [10] Micheli L, Fernández EF, Almonacid F, et al. (2016) Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of high concentrator photovoltaics. *Sol Energ Mat Sol C* 153: 164–178.
- [11] Nagano H, Ohnishi A, Nagasaka Y (2001) Thermophysical properties of high-

thermal-conductivity graphite sheets for spacecraft thermal design. *J Thermophys Heat Tr* 15: 347–353.

[12] Nemoto E, Gunji T, Yamashita K, et al. (2009) Simultaneous separation measurement of principal thermal conductivities and principal axis angle of pyrolytic graphite sheet for two-dimensional anisotropic material using integrated multi-temperature probe method. *Jpn J Appl Phys* 48: 05EB03.

[13] Wen CY, Huang GW (2008) Application of a thermally conductive pyrolytic graphite sheet to thermal management of a PEM fuel cell. *J Power Sources* 178: 132–140.

[14] Zhou H, Zhu J, Liu Z, et al. (2014) High thermal conductivity of suspended few-layer hexagonal boron nitride sheets. *Nano Res* 7: 1232–1240.

[15] Aliev AE, Lima MH, Silverman EM, et al. (2010) Thermal conductivity of multi-walled carbon nanotube sheets: radiation losses and quenching of phonon modes. *Nanotechnology* 21: 035709.

[16] Che J, Çağın T, Deng W, et al. (2000) Thermal conductivity of diamond and related materials from molecular dynamics simulations. *J Chem Phys* 113: 6888–6900.

[17] Che J, Çağın T, Goddard III WA (2000) Thermal conductivity of carbon nanotubes. *Nanotechnology* 11: 65.

[18] Inagaki M, Kaburagi Y, Hishiyama Y (2014) Thermal management material: graphite. *Adv Eng Mater* 16: 494–506.

[19] Kidalov S, Shakhov F (2009) Thermal conductivity of diamond composites. *Materials* 2: 2467–2495.

[20] Varshney V, Patnaik SS, Roy AK, et al. (2010) Modeling of thermal transport in pillared-graphene architectures. *ACS Nano* 4: 1153–1161.

[21] Zhang G, Jiang S, Yao W, et al. (2016) Enhancement of natural convection by carbon

nanotube films covered microchannel-surface for passive electronic cooling devices. *ACS Appl Mater Inter* 8: 31202–31211.

[22] Walsh E, Grimes R (2007) Low profile fan and heat sink thermal management solution for portable applications. *Int J Therm Sci* 46: 1182–1190.

[23] Bao H, Yan C, Wang B, et al. (2017) Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling. *Sol Energ Mat Sol C* 168: 78–84.

[24] Chen Z, Zhu L, Raman A, et al. (2016) Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day–night cycle. *Nature Commun* 7: 13729.

[25] Granqvist CG, Hjortsberg A (1981) Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *J Appl Phys* 52: 4205–4220.

[26] Hossain MM, Gu M (2016) Radiative cooling: principles, progress, and potentials. *Adv Sci* 3: 1500360.

[27] Kecebas MA, Menguc MP, Kosar A, et al. (2017) Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters. *J Quant Spectrosc Ra* 198: 179–186.

[28] Huang Z, Ruan X (2017) Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling. *Int J Heat Mass Tran* 104: 890–896.

[29] Kou JL, Jurado Z, Chen Z, et al. (2017) Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters. *ACS Photonics* 4: 626–630.

[30] Raman AP, Anoma MA, Zhu L, et al. (2014) Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature* 515: 540–544.

[31] Nishioka K, Ota Y, Tamura K, et al. (2013) Heat reduction of concentrator photovoltaic module using high radiation coating. *Surf Coat Tech* 215: 472–475.

[32] Chen H, Ginzburg VV, Yang J, et al. (2016) Thermal conductivity of polymer-based

composites: Fundamentals and applications. *Prog Polym Sci* 59: 41–85.

[33] Choi S, Kim J (2013) Thermal conductivity of epoxy composites with a binary-particle system of aluminum oxide and aluminum nitride fillers. *Compos Part B-Eng* 51: 140–147.

[34] Hashim NH, Anithambigai P, Mutharasu D (2015) Thermal characterization of high power LED with ceramic particles filled thermal paste for effective heat dissipation. *Microelectron Reliab* 55: 383–388.

[35] Shao Y, Shi FG (2017) Passive cooling enabled by polymer composite coating: Dependence on filler, filler size and coating thickness. *J Electron Mater* 46: 4057–4061.

[36] Tsuda S, Shimizu M, Iguchi F, et al. (2017) Enhanced thermal transport in polymers with an infrared-selective thermal emitter for electronics cooling. *Appl Therm Eng* 113: 112–119.

[37] Yuan C, Li L, Duan B, et al. (2016) Locally reinforced polymer-based composites for efficient heat dissipation of local heat source. *Int J Therm Sci* 102: 202–209.

[38] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN, *Transport Phenomena* (John Wiley & Sons, Inc., 1960)

[39] Nishioka K, Araki K, Ota Y, et al. (2011) Heat release effect of high radiation layer coated on aluminum chassis of concentrator photovoltaic module. 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems.

## 第 3 章 シリコン太陽電池モジュールにおける放熱塗料の効果

### 3.1 諸言

太陽光発電は、クリーンで穏やかなエネルギー源として全世界的に着実に普及しつつある。その理由として、太陽光発電システムは従来の発電システムとは異なる以下の長所がある[1]。

- ・クリーンなエネルギー

光から電気エネルギーへの変換は、半導体特有の量子効果 (quantum effect) によるもので、従来の発電に必要な回転機構は不要である。よって、騒音や爆発の危険はなく、環境影響も極めて少ない。

- ・メンテナンスが簡便

回転機構を要しないため機械的な動作部分がなく、よって摺動による摩耗等はなく消耗部品もほとんどない。日々のメンテナンスも不要でシステムの無人化や自動化が可能である。

- ・スケールメリット

太陽電池はコンパクトなモジュール構造として製造されるため、量産性が高く、連続自動化生産対応が容易にできる。よって低コストでの生産が可能となる。

- ・自然エネルギーを有効に活用

例えば、火力発電は重油を燃焼させることで電力を得るが、その総合効率は 38% で 62% の重油は電力に変換されていない。一方、太陽電池の変換効率は 15% 程度であるが、その原料は無限に降り注ぐ太陽光であり、エネルギーコストはかからない。変換効率は低いものの、従来無駄に廃棄していた自然エネルギーを電

力に変えて有効活用している点で他の発電とは大きく異なる。

以下に太陽電池の発電原理について述べる[1-4]。

半導体に振動数  $\nu_0$  の光が入射し、光子一個当たりのエネルギー  $h\nu_0$  が半導体のエネルギーギャップ（禁制帯幅）  $E_g$  以上の大きさを持つとき、光速を  $c$ 、プランク定数を  $h$ 、振動数を  $\nu_0$ 、基礎吸収端波長を  $\lambda_0$ （Si で約  $1.1 \mu\text{m}$ ）とすると、その関係式は式(3.1)で表される。

$$h\nu_0 = hc/\lambda_0 = E_g \quad (3.1)$$

図 3.1 に pn 接合の光起電力効果を示す。半導体に光が照射されて光伝導現象が生じる際に、光によって生成されるキャリアに位置による不均一性があったり、pn 接合などの内蔵電場が存在すると、拡散あるいはドリフト効果により、生成された電子と正孔の密度分布の平衡が崩れて起電力が発生する。このような現象を光起電力効果（photo-voltaic effect）と呼ぶ。

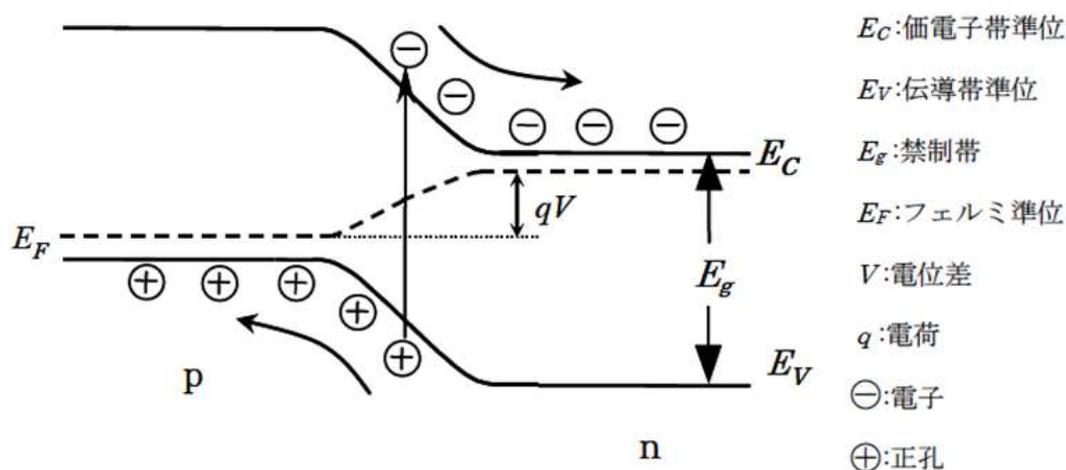


図 3.1 光起電力効果[1]

光起電力効果を得るには、半導体にあらかじめ内蔵電場が存在する必要がある。物質の界面に発生する電位差が利用される。一般に、電子特性の異なる二つの物質を接触させると、その界面に接触電位差が生じる。例えば乾電池は鉛や炭素棒と電解液との界面で生じる接触電位差を外部に取り出したものである。同様に、半導体と金属との界面や 2 種類の半導体の界面にも、組み合わせる材料によって特有の接触電位差が発生する。半導体 pn 接合は、このような界面の内蔵電場を最も再現良くつくる工業的な方法であり、現在実用化されている太陽電池の多くは半導体 pn 接合の構造を持つ。

図 3.2 に太陽電池の電圧－電流特性を示す。

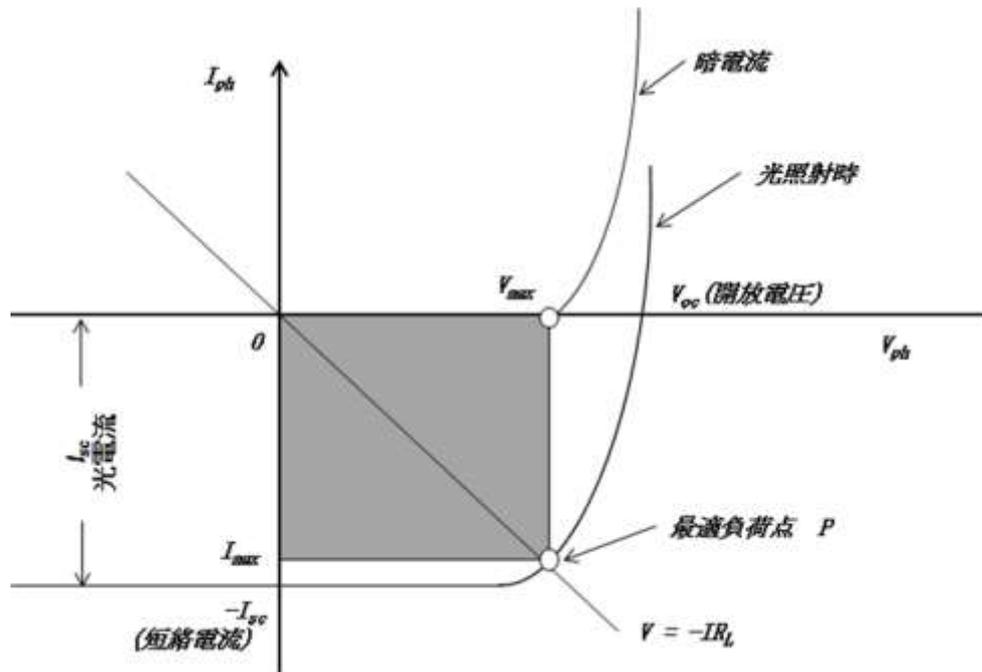


図 3.2 太陽電池の電圧－電流特性[1]

太陽電池では一般に n 型から p 型に電流が流れるため、実際の太陽電池における電圧－電流特性は、p 型を正として太陽電池の端子電圧  $V$ 、流れる電流を  $I$  とすれば式(3.2)で表される[5]。

$$I = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} - I_{sc} \quad (3.2)$$

ここで  $I_{sc}$ ,  $I_0$  はそれぞれ短絡電流と飽和電流を、 $q$  は電気素量、 $n$  は理想因子、 $k$  はボルツマン係数を、 $T$  は絶対温度を表す。

太陽電池を開放状態にすると光電流の大きさに対応して起電力が生じる。これが開放電圧である。つまり、式(3.2)において  $I=0$  (開放) とすると式(3.3)が導かれ、開放電圧  $V_{oc}$  を求めることができる。

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left\{\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right\} \quad (3.3)$$

図 3.2 で太陽電池に最適負荷抵抗  $R_L$  を接続したときの最適負荷点  $P$  は、図中に示した出力特性  $V_{max}$  と  $I_{max}$  の交点として表示され、図中のグレーの部分で示した面積が出力パワーに相当する。これを式(3.2)に従って一般化すると、太陽電池の端子電圧  $V$ 、負荷に流れる電流を  $I$  とした場合の出力エネルギー  $P_{out}$  は、式(3.4)で表される。

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot \{I_{sc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]\} \quad (3.4)$$

最適負荷点  $P_{max}$  では  $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$  になることから、式(3.4)より、最適動作電圧

$V_{\max}$  は、式(3.5)の関係式で表される。

$$\exp\left(\frac{qV_{\max}}{nkT}\right)\left(1 + \frac{qV_{\max}}{nkT}\right) = \left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) + 1 \quad (3.5)$$

このときの最適動作電流  $I_{\max}$  は式(3.6)により求められる。

$$I_{\max} = \frac{(I_{sc} + I_0) \cdot qV_{\max}/nkT}{1 + (qV_{\max}/nkT)} \quad (3.6)$$

太陽電池の性能は、自然太陽放射光スペクトルを模擬したソーラーシミュレーターを用いた標準試験条件（STC：照射  $1 \text{ kW/m}^2$ 、モジュール温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、グローバルスペクトラム AM1.5）で測定されるが、実際の使用下では太陽光の照射状況や環境温度などの影響により発電効率は変化する。特に温度の影響は大きく、太陽電池セルは太陽光を受けることにより温度上昇するが、温度の上昇に伴い変換効率は低下する[6-16]。

図 3.3 に単結晶シリコン太陽電池の温度特性を示す[1]。温度の上昇とともに  $I_{sc}$ （光電流）は増加するが、それ以上に  $V_{oc}$  が減少し変換効率は低下する傾向にある。よって、外部環境下でも一定以上の発電量を保つには、太陽電池モジュールのセル温度を一定温度以下に保つことが重要となる。

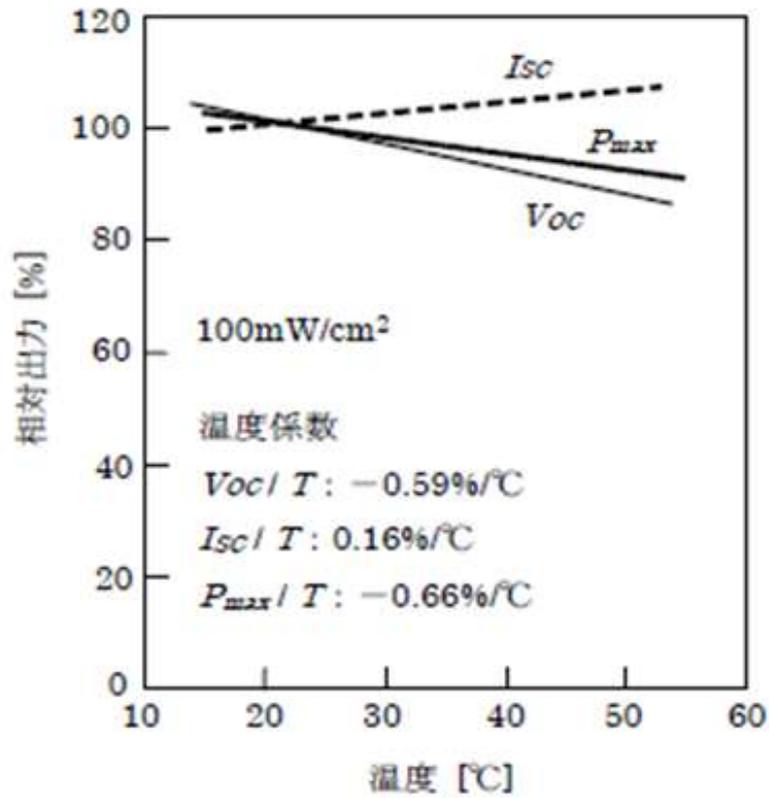


図 3.3 結晶型 Si 太陽電池モジュールの温度－出力特性[1]

第 3 章では、第 2 章で検討した 400K 以下の温度で特徴的な放熱特性を有する CaF<sub>2</sub> 粒子を用いた放熱塗料を、シリコン太陽電池モジュールのバックシートに適用し、その温度低減効果とそれに伴う変換効率向上について検証した。その結果について述べる。

## 3.2 実験方法

図 3.4 に測定に用いた単結晶シリコン太陽電池モジュール（受光部：1200 mm×527 mm、以下 PV モジュールと記す）を示す。背面のバックシートに放熱塗装を施した PV モジュールと、未塗装バックシートの PV モジュール（標準モジュール）の出力特性を比較した。スプレー塗装により形成された放熱塗膜の厚みは 30  $\mu\text{m}$  で、PV モジュールの動作温度 40～100  $^{\circ}\text{C}$  において熱放射率の高い無機フィラー（主成分  $\text{CaF}_2$ ）とアクリル樹脂で構成されている。塗膜の熱放射率は 0.95 である。

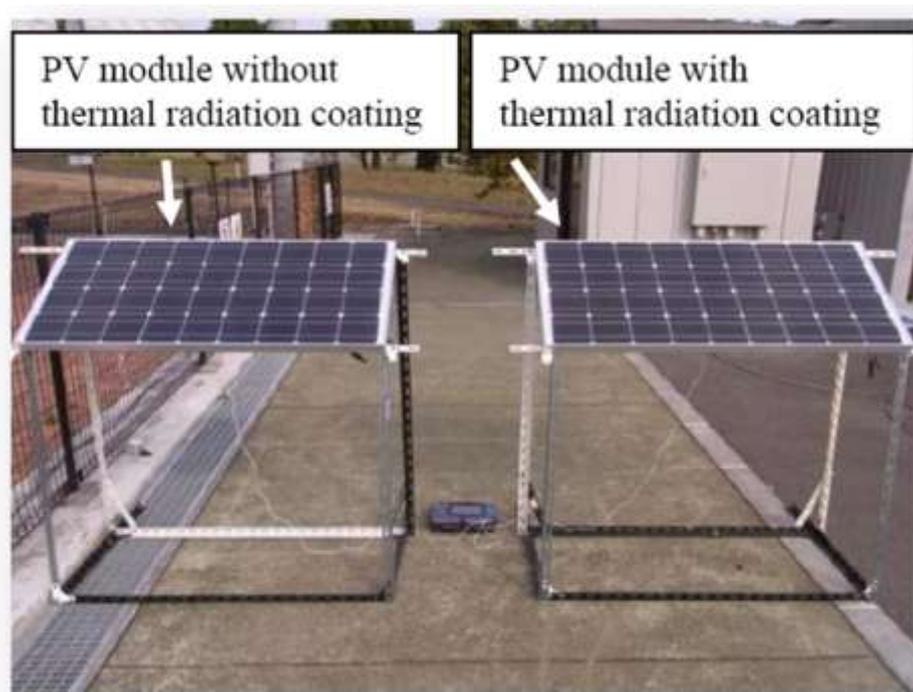


図 3.4 試験に用いた結晶型シリコン PV モジュール

図 3.5 に示すように、モジュール背面には PV モジュールの温度 ( $T_{\text{mod}}$ ) を測定するために Pt100 測温抵抗体をセットした。また、発生する電流-電圧特性を測定するために  $I$ - $V$  カーブトレーサー (MP-160 英弘精機製) を使用した。それ

ぞれの PV モジュールは宮崎大学構内に設置し測定を行った。



図 3.5 PV モジュールの背面（中央部に Pt100 測温抵抗体を設置）

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 放熱性能の温度依存性

図 3.6 に PV モジュールの温度 ( $T_{\text{mod}}$ ) とその時の環境温度を掲げる。赤色の線が標準 PV モジュールの温度、青色の線が放熱塗膜を施した PV モジュール温度、緑色の線はその時の環境温度を表している。

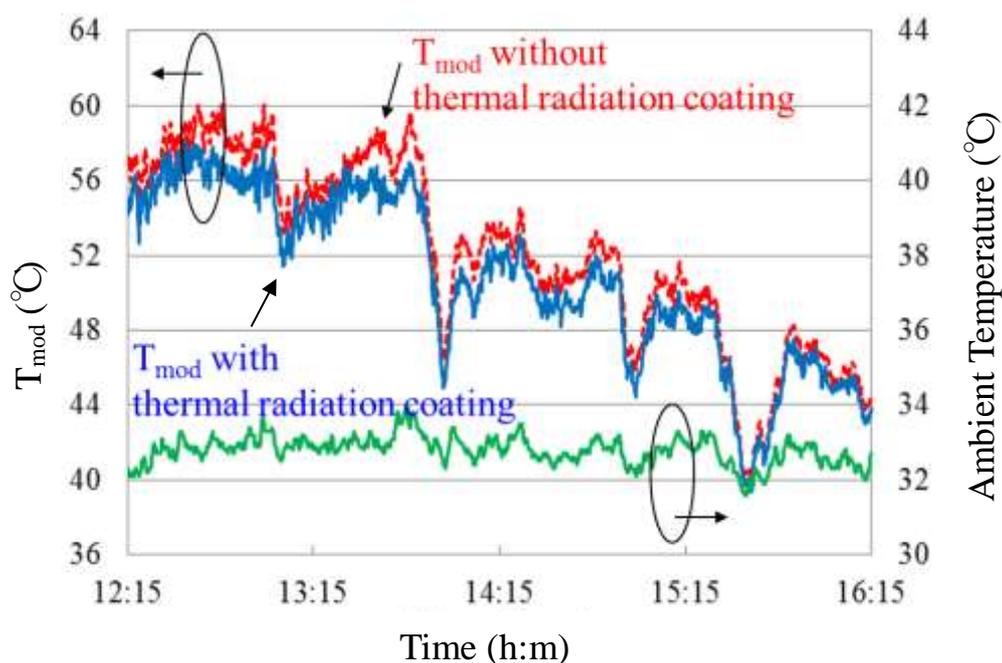


図 3.6 各モジュール温度と気温の経時変化

環境温度は測定時間内においてほぼ安定していた。PV モジュールの温度については放熱塗膜の効果が顕著に見られ、放熱塗装を施したモジュールのほうが低い結果となった。

図 3.7 に標準 PV モジュールの温度 ( $T_{\text{mod}}$ ) と、標準モジュールと放熱塗装を施したモジュールの温度差 ( $T_{\text{mod}} [\text{標準}] - T_{\text{mod}} [\text{放熱塗装}]$ ) を表すグラフを掲げる。青色の線が標準 PV モジュールの温度、赤色の線がモジュールの温度差を

示している。温度差の最大値は 12:57 の 3.38 °C であった。標準 PV モジュールの温度が上昇するにしたがって、モジュールの温度差は拡大している。

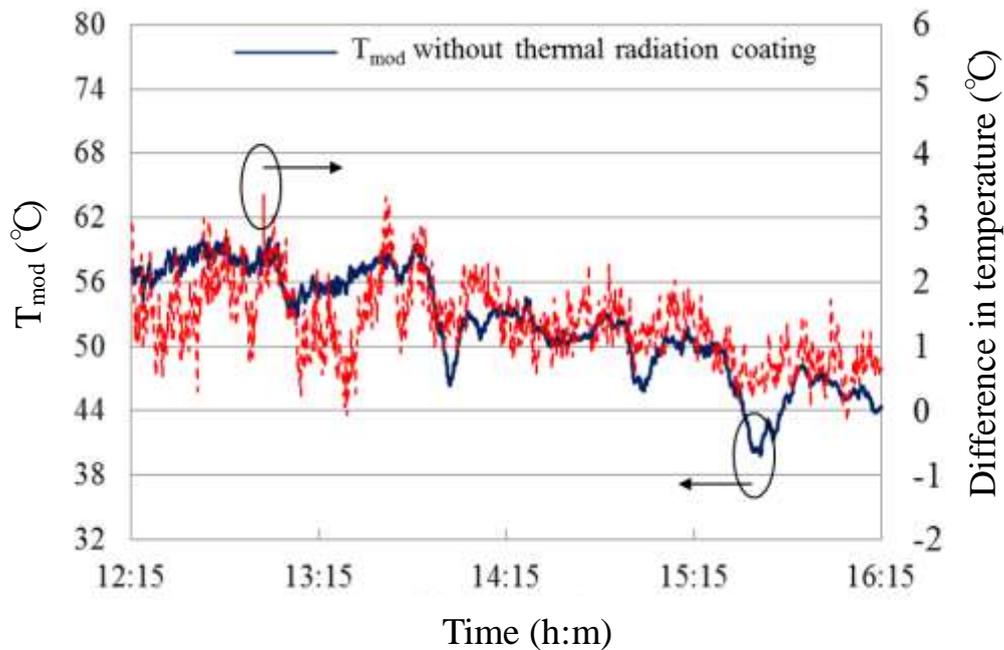


図 3.7 モジュール温度と温度差の相関

PV モジュールの背面の面積を  $A_1$  ( $\text{m}^2$ )、放射率を  $\varepsilon_1$ 、外部の環境エリアを無限大とすると、PV モジュールの背面から外部に放射される熱量は式(3.7)により  $Q_{12}$  (W) と計算される。

$$Q_{12} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

式中の  $\sigma$  はステファン-ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )、 $T_1, T_2$  はそれぞれ PV モジュールの絶対温度(K)と外部環境の絶対温度 (K)を表す。この式は放射率が高くなると放射される熱量も高くなることを示しているが、一般的なバ

ックシートの材質である PET や PVF、PVDF も熱放射率は 0.95 近辺にあり、放熱塗料の熱放射率とほぼ同等である。しかし、今回の実験では未塗装よりも放熱塗装のほうが、放熱性能が高かったことから、 $\varepsilon_1$  の値は  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  で測定される一般の放射率ではなく、モジュール温度 ( $T_1$ ) に対応する狭い領域 ( $7.8\sim 9.3\ \mu\text{m}$ ) での放射率で、評価されなければならないと考える。また、放出される熱量  $Q_{12}$  はモジュール温度 ( $T_1$ ) の上昇とともに大きくなる。よって、標準 PV モジュールと放熱塗装を施した PV モジュールの温度差 ( $T_{\text{mod}}[\text{標準}] - T_{\text{mod}}[\text{放熱塗装}]$ ) は、PV モジュールの温度が上昇するにしたがって大きくなる。

### 3.3.2 放熱効果の検証

図 3.8 に標準 PV モジュールと放熱塗装を施した PV モジュールの開放電圧 ( $V_{oc}$ ) の関係を示す。赤色の線が標準 PV モジュールの開放電圧、青色の線が放熱塗装を施した PV モジュールの開放電圧を表している。放熱塗装 PV モジュールの  $V_{oc}$  はテスト中、常に標準 PV モジュールの  $V_{oc}$  よりも 0.1 V 高かった。PV モジュールの  $V_{oc}$  は、温度が上昇するにしたがって低下する。

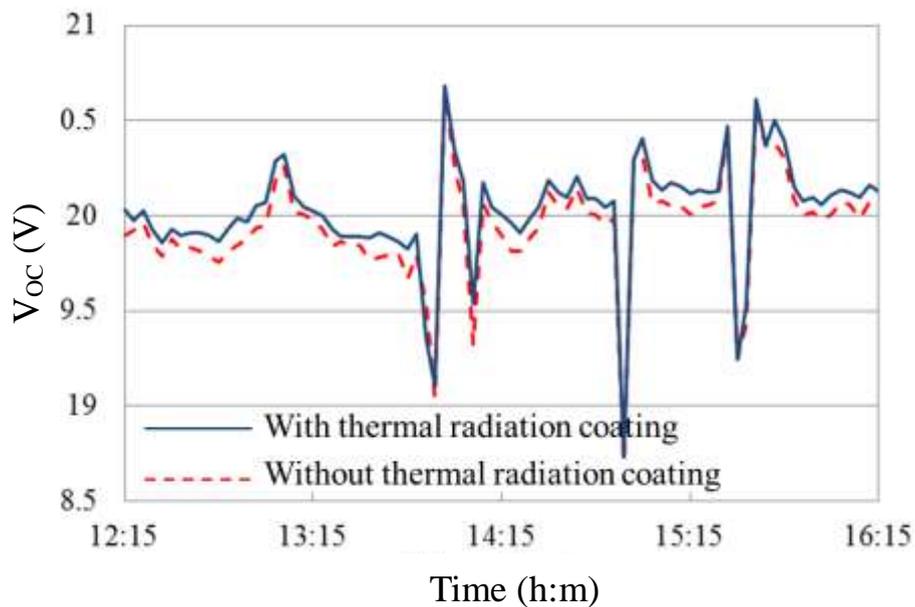


図 3.8 各モジュールの  $V_{oc}$  の経時変化

太陽電池セルの  $I$ - $V$  特性は、3.1 項で述べたように式(3.2)で関係づけられる。

$$I = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} - I_{sc} \quad (3.2)$$

式(3.2)において  $I=0$  (開放) とすると、開放電圧 ( $V_{oc}$ ) は式(3.3)で導かれる。

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left\{\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right\} \quad (3.3)$$

式(3.3)は飽和電流 ( $I_0$ ) の温度特性が開放電圧 ( $V_{oc}$ ) に大きく影響することを示唆している。飽和電流密度 ( $J_0$ ) は式(3.8)で導かれる。

$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_e}{N_A W_p} + \frac{D_h}{N_D W_n} \right) \quad (3.8)$$

ここで、 $n_i$  は真性キャリア密度、 $N_A$  および  $N_D$  はそれぞれアクセプター密度とドナー密度、 $W_p$  および  $W_n$  はそれぞれ  $p$  と  $n$  の中性領域の厚み、 $D_e$  と  $D_h$  は、それぞれ電子および正孔の拡散定数である[17]。 $J_0$  は  $n_i$  の 2 乗に比例することから式(3.9)の関係より  $T$  に大きく依存することになる。

$$n_i^2 = 4M_c M_v (2\pi kT/h^2)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp(-E_g/kT) \quad (3.9)$$

ここで、 $M_c$  と  $M_v$  はそれぞれ伝導帯と価電子帯の等価な極小点数、 $h$  はプランク定数、 $m_e^*$  および  $m_h^*$  はそれぞれ電子と正孔の有効質量を表す [18]。

式(3.3)と式(3.8)、式(3.9)より、温度上昇に伴う  $V_{oc}$  の低下は、主に  $n_i$  の変化に起因することがわかった。 $J_0$  の値は  $1/T$  の減少に伴って指数関数的に増加し、 $V_{oc}$  は  $T$  の増加に対して直線的に低下する。

図 3.9 に PV モジュールの変換効率と温度との関係を示す。▲が標準 PV モジュールを、●が放熱塗装を施した PV モジュールを表している。変換効率は温度の上昇とともに直線的に低下した。また、図 3.7 で示したように、放熱塗装 PV

モジュールの温度は放熱効果により標準 PV モジュールよりも 2~3°C低いことから、図 3.9 のプロットは標準 PV モジュールよりも低温側にシフトした。これは、放熱塗装を施した PV モジュールが標準モジュールよりも 2~3°C 低い温度領域で作動することにより、変換効率の低下を防いでいることを示している。

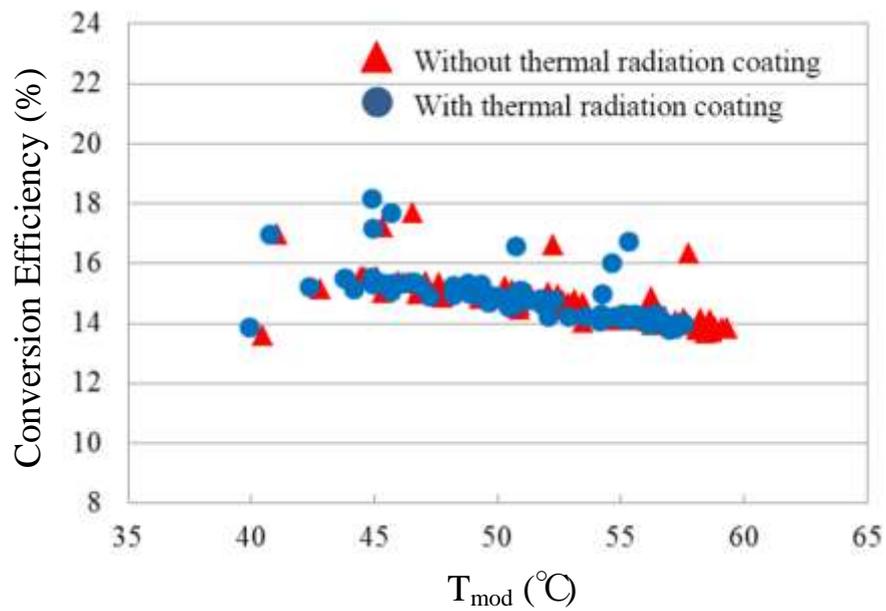


図 3.9 各モジュールの変換効率と温度

### 3.4 結言

背面のバックシートに放熱塗膜を施した単結晶シリコン太陽電池モジュール（受光部：1200 mm×527 mm）を作成した。放熱塗膜は無機フィラーとアクリル樹脂で構成されるが、第 2 章の検証結果から PV モジュールの作動温度の 40～100 °C に大きな熱放射特性を持つ CaF<sub>2</sub> を無機フィラーとして採用した。放熱層はスプレー塗装により厚み 30 μm になるように塗布し、乾燥、硬化させた。塗膜の熱放射率は 0.95 である。PV モジュールの温度 ( $T_{\text{mod}}$ ) を測定するために、モジュール背面に Pt100 測温抵抗体を取り付けた。放熱層を施した PV モジュールの温度は、放熱層のない標準の PV モジュールよりも低く、開放電圧 ( $V_{\text{oc}}$ ) は終始 0.1 V 高かった。特定の波長において顕著な熱放射特性を持つ放熱塗膜を設けることにより、同一の環境下で PV モジュールの作動温度は 2～3 °C 下がり、変換効率は向上する。本研究では、熱放射の理論に基づき、対象物の作動範囲に適した放熱塗装を施すことにより、PV モジュールの出力を容易に向上できることを実証した。

### 3.5 引用文献

- [1] 浜川圭弘 桑野幸徳 「太陽光エネルギー工学」 (アドバンストエレクトロニクスシリーズ) 培風館 (1994)
- [2] Yamaguchi M, Takamoto T, Araki K (2006) Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* 90: 3068-3077.
- [3] Takamoto T, Kaneiwa M, Imaizumi M, et al. (2005) InGaP/GaAs-based multijunction solar cells. *Prog Photovoltaics Res Appl* 13: 495-511.
- [4] 高橋清「半導体工学[第2版]—半導体物性の基礎—」(森北電気工学シリーズ4) 森北出版 (1993)
- [5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley-Interscience Publication, 1981)
- [6] Nishioka K, Hatayama T, Uraoka Y, et al. (2003) Field-test Analysis of PV System Output Characteristics Focusing on Module Temperature. *Sol Energy Mater Sol Cells* 75: 665.
- [7] Nishioka K, Sakitani N, Kurobe K, et al. (2003) Analysis of the Temperature Characteristics in Polycrystalline Si Solar Cells Using Modified Equivalent Circuit Model. *Jpn J Appl Phys* 42: 7175.
- [8] Nishioka K, Takamoto T, Agui T, et al. (2005) Evaluation of temperature characteristics of high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells under concentration. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 85: 429.
- [9] Nishioka K, Takamoto T, Agui T, et al. (2006) Annual Output Estimation of Concentrator Photovoltaic Systems Using High-Efficiency InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells Based on Experimental Solar Cell's Characteristics and Field-Test Meteorological Data. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90: 57.
- [10] Nishioka K, Sueto T, Uchida M, et al. (2010) Detailed Analysis of Temperature

Characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell. *Journal of Electronic Materials* 39: 704.

[11] Nishioka K, Ota Y, Tamura K, et al. (2013) Heat reduction of concentrator photovoltaic module using high radiation coating. *Surface and Coatings Technology* 215: 472.

[12] Ota Y, Sueto T, Nagai H, et al. (2013) Reduction of Operating Temperature in 25 Series-Connected 820X CPV. *Jpn. J. Appl. Phys.* 52: 04CR03.

[13] Nomura K, Ota Y, Minemoto T, et al. (2014) Output Estimation of Concentrator Photovoltaic Using Mappings of Environmental Factors and Performance Ratio. *ACTA PHYSICA POLONICA A* 125: 1021.

[14] Nomura K, Ota Y, Minemoto T, et al. (2014) Seasonal variation of performance in concentrator photovoltaic system. *Physica Status Solidi (c)* 11: 1427.

[15] Ota Y, Nagai H, Araki K, et al. (2014) Estimation of operating temperature and energy output of concentrator photovoltaic module under concentration conditions. *Jpn. J. Appl. Phys.* 53: 122301.

[16] Sakurada Y, Ota Y, Nishioka K, (2011) Simulation of Temperature Characteristics of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell under Concentrated Light. *Jpn. J. Appl. Phys.* 50: 04DP13.

[17] Antognetti P, Massobrio G, *Semiconductor Device Modeling with SPICE* (McGraw-Hill, 1988)

[18] Fahrenbruch AL, Bube RH, *Fundamentals of Solar Cells* (Academic Press, Inc., 1983)

## 第 4 章 有風時に効果を発揮する放熱塗料の設計とその効果

### 4.1 諸言

第 2 章での検証結果から、第 3 章では単結晶シリコン太陽電池モジュールのバックシートに 100 °C 以下で顕著な熱放射能を有する  $\text{CaF}_2$  を主フィラーとして配合した放熱塗料を塗布し、その効果を検証した。もともと第 2 章では、電子機器の内部の熱対策を想定し、対流の効果が期待できない密閉空間での輻射に着目して、電子機器の熱対策が必要な特定の温度域で効果を発揮するフィラーを探索してきた。しかし、太陽光発電は電子機器の熱対策と同じく 100 °C 以下の低温度領域での放熱が要求されるが、屋外（開放空間）に設置されるため、風などの外部環境の影響が大きく、輻射よりも対流の効果が大きいと考えられる。そこで、第 4 章では太陽光発電の熱対策を想定し、対流も含めて外部環境を考慮した放熱塗料の設計とその効果について述べる。

機器の放熱において、輻射、自然対流、強制対流のそれぞれの影響を把握することは重要であり、その測定には風洞が使用される[1-4]。本研究では宮崎大学の室内開放押し込み式（エッフェル型）のマルチファン型風洞を使用し、放熱塗料の性能を評価した。本風洞の構成上、高い周波数の変動（数十 Hz 以上）まで厳密に生成することは難しいが、風環境に関する実験的な研究分野では高い利便性を発揮する装置である[5]。

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 放熱塗料の調製

第2章 2.2項の実験方法に準じて4点の放熱塗料サンプルを試作した。熱放射性フィラーは第2章の結果に基づき  $\text{CaF}_2$  を選定、さらに熱伝導性フィラーとして、熱伝導性が高く、かつ、 $100\text{ }^\circ\text{C}$  以下での赤外放射能を有する  $\text{SiC}$  を選定した。

#### 4.2.2 試験体

図 4.1 に試験体の寸法図、図 4.2 に実際に使用した試験体を示す。今回使用した試験体は、縦:95 mm×横:60 mm×厚さ:3 mm の Al 基板で、温度測定用の Pt100 測温抵抗体を差し込むために、端面中央部に直径 1.1 mmφ×深さ 10 mm の穴を開けた。放熱層は第 3 章で使用した熱放射タイプと、対流の効果を検討し、無機ファイバーとして SiC を使用した熱伝導タイプの 2 種類を用いて比較した。熱源はラバーヒーター（坂口電熱製:sh1060lt）を使用し、熱伝導性両面テープ（マクセルスリオンテック製 No.5065）で試験体表面に固定した。

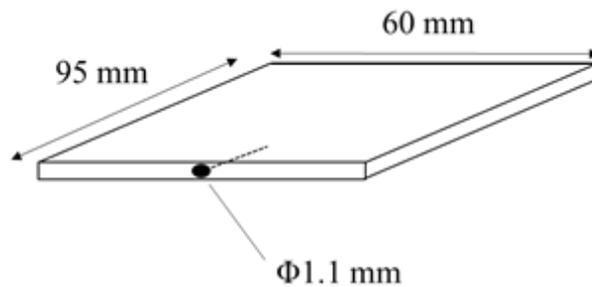


図 4.1 試験体寸法図



図 4.2 測定に使用した試験体

### 4.2.3 試験体の固定方法

以下に今回の測定に使用した試験体架台と固定方法について述べる。

測定に使用する試験体の架台は自作した。概略図を図 4.3 に示す。試験体は図 4.4 に示すように、固定具を使用して吊り下げる形で固定した。試験体と固定具の接触面は熱伝導による影響を極力減らすために熱伝導性の低いシート状のシリコンゴムを挟み込んだ。

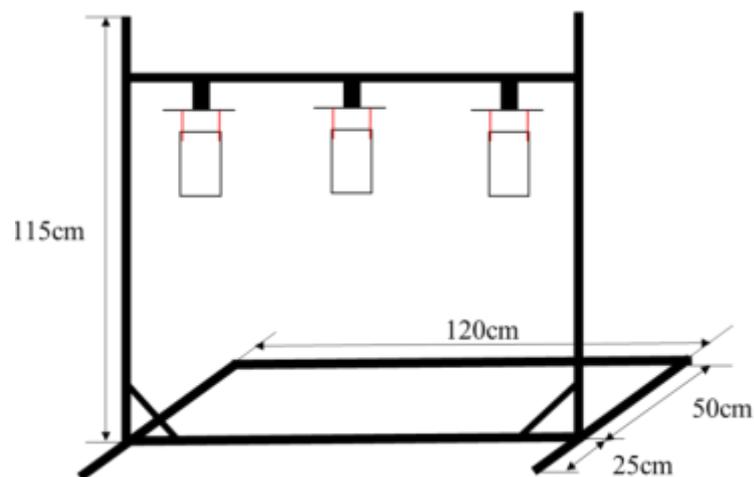


図 4.3 架台の概略図

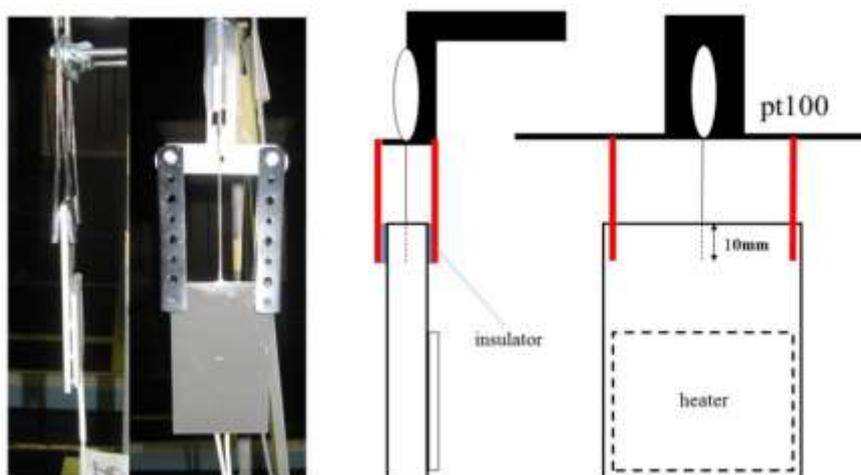


図 4.4 試験体の固定方法

#### 4.2.4 風洞

図 4.5 に本研究で使用した風洞を示す。宮崎大学の室内開放押し込み式（エッフェル型）のマルチファン型風洞を使用した。この風洞には直径 270 mm の AC ファンが縦 11 個、横 9 列の合計 99 個配置されており、測定洞下流に設置された 21 枚の振動翼列（NACA0010）により気流を発生させる。個々の AC ファンは、0.02 s 毎に送られる信号によりそれぞれ独立して制御される。ファンと振動翼を個々に制御することにより、発生する風の平均速度  $U$ 、乱れ強度  $I_u$ 、インテグラルスケール  $Lu$  等の鉛直方向分布を風洞内で自由にコントロールする。



図 4.5 室内開放押し込み式マルチファン型風洞

#### 4.2.5 実験手順

図 4.6 に装置接続図を示す。1 台の直流安定化電源 (KIKUSUI 製 : PAG150-16) に、比較のため条件の異なる 3 つの試験体を並列に接続した。試験体の温度は各試験体に備えた Pt100 測温抵抗体をメモリハイロガー (HIOKI 製 : LR8401) に接続して測定した。

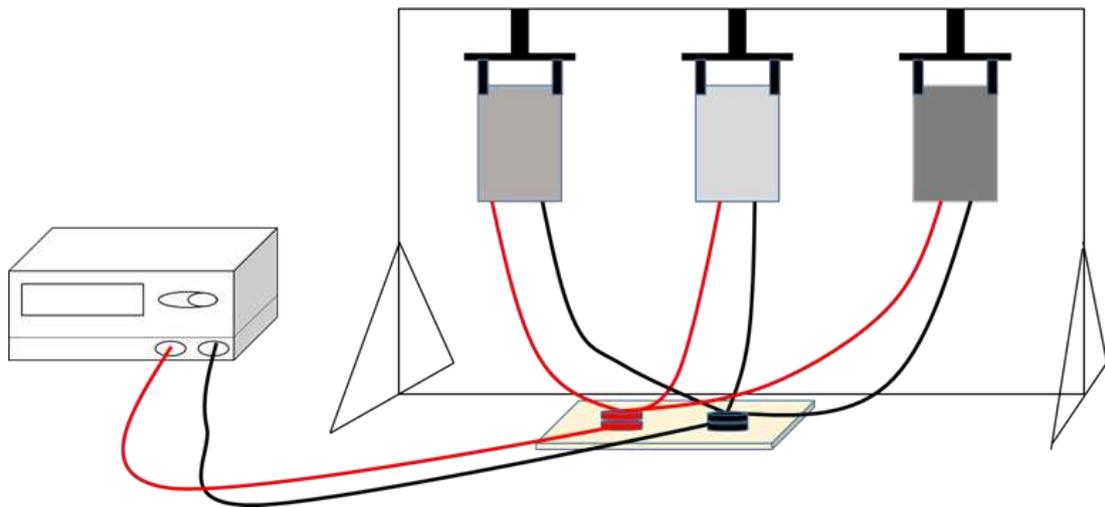


図 4.6 装置接続図

3 点の試験体を固定した架台を風洞内に設置した。設置の様子を図 4.7 に示す。風の当たり方による差を見るため、試験体の向きは風に対して正面  $0^\circ$ 、正面  $45^\circ$ 、正面  $90^\circ$  の 3 パターンとした (図 4.8)。



図 4.7 風洞内に設置された試験体

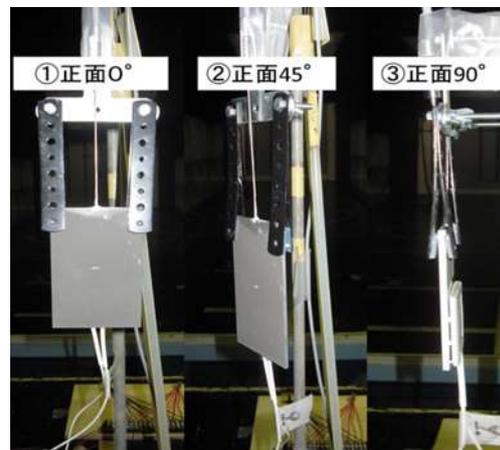
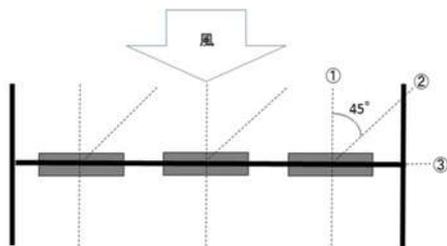


図 4.8 試験体の設置向き

図 4.9 に風洞内部の概略図を示す。風洞の断面は縦 1.80 m×横 2.54 m で、試験体架台は風流入口から 7.0 m の位置に設置、風速は試験体の上部 1.23 m の位置にピトー管を設置して測定した。

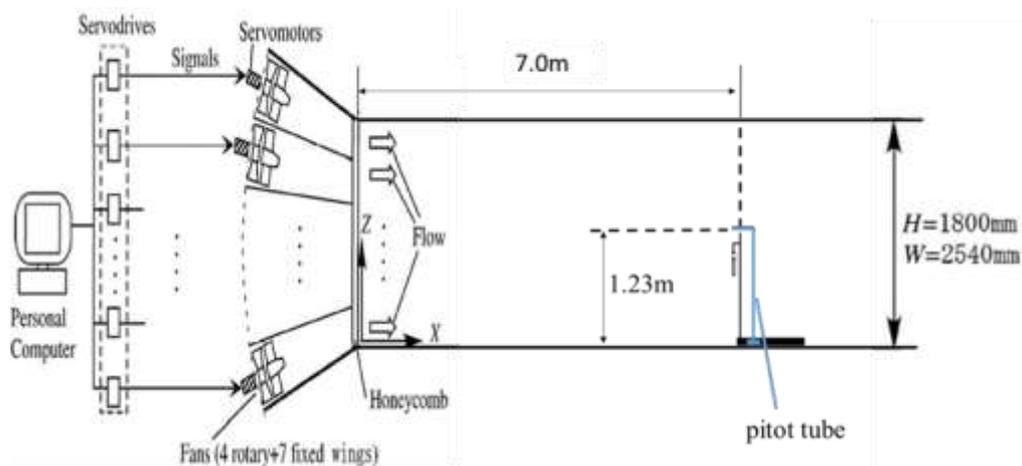


図 4.9 風洞内部概略図

図 4.10 に測定の流れを示す。試験体は電流印加後 60 分で温度が定常状態になるため、印加 60 分後に風の発生を開始した。試験体は風が当たることにより温度が低下するが、20 分で定常状態になる。よって 20 分ごとに風速を変化させ、風速ごとの試験体の温度を測定した。

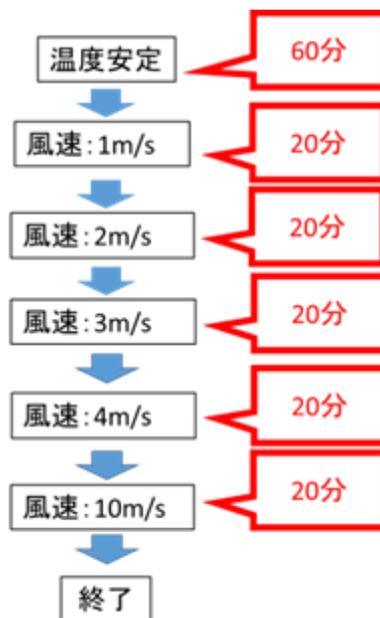


図 4.10 測定フロー図

## 4.3 実験結果と考察

### 4.3.1 有風時に効果を発揮する放熱塗料の材料設計

輻射と対流の効果を比較するため、高熱放射タイプの塗料には第 2 章の検証結果から熱放射フィラーとして  $\text{CaF}_2$  を選定した。また、有風時に効果を発揮する高熱伝導タイプの塗料の無機フィラーとしては、第 2 章の評価では  $\text{CaF}_2$  に比べて放熱効果は大きくなかったが、熱伝導性が  $\text{CaF}_2$  より 17 倍高い ( $170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )  $\text{SiC}$  を選定した。

高熱伝導タイプについては、熱伝導性ととも熱伝達係数を高めるため、 $\text{SiC}$  フィラーの粒子径、形状、塗布厚みにも配慮し、最終的に表 4.1 に示す高熱伝導タイプ①を調製した。高熱伝導タイプ①の塗膜の熱伝導率は、高熱放射タイプ  $0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  に対して  $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  と大幅に向上、塗膜の表面積は約 2 倍まで拡大している。 $\text{CaF}_2$  を使用した熱放射タイプの塗料は高熱放射タイプ①とし、風洞実験により両者の放熱効果を比較した。

表 4.1 試験 1 に使用した放熱塗料の特性

項目	単位	未塗装 (Al表面)	高熱放射タイプ①	高熱伝導タイプ①	
フィラー主成分	—	—	$\text{CaF}_2$	$\text{SiC}$	
フィラーの熱伝導率	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	—	10	170	
強い熱放射能を持つ波長とその温度	—	$3\mu\text{m} <$ $700^\circ\text{C} <$	$8.2\sim 11.5\mu\text{m}$ $100\sim 0^\circ\text{C}$	$10.5\mu\text{m} <$ $20^\circ\text{C} >$	
フィラー含有率	Vol.%	—	20	60	
粒子径	$\mu\text{m}$	—	1~10	1~5	
塗膜 (素材) の熱伝導率	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	230	0.1	2	
塗膜 (表面) の熱放射率	—	$0.3 >$	0.96	0.94	
塗膜表面粗さ	$R_a$	$\mu\text{m}$	未測定	0.1	2.29
	$R_q$	$\mu\text{m}$	未測定	0.14	2.92
	$R_{\text{max}}$	$\mu\text{m}$	未測定	1.43	22.54
表面積	$\mu\text{m}^2$	未測定	2.25	4.21	

図 4.11 と図 4.12 に高熱放射タイプ①と高熱伝導タイプ①の塗膜断面写真を示す。

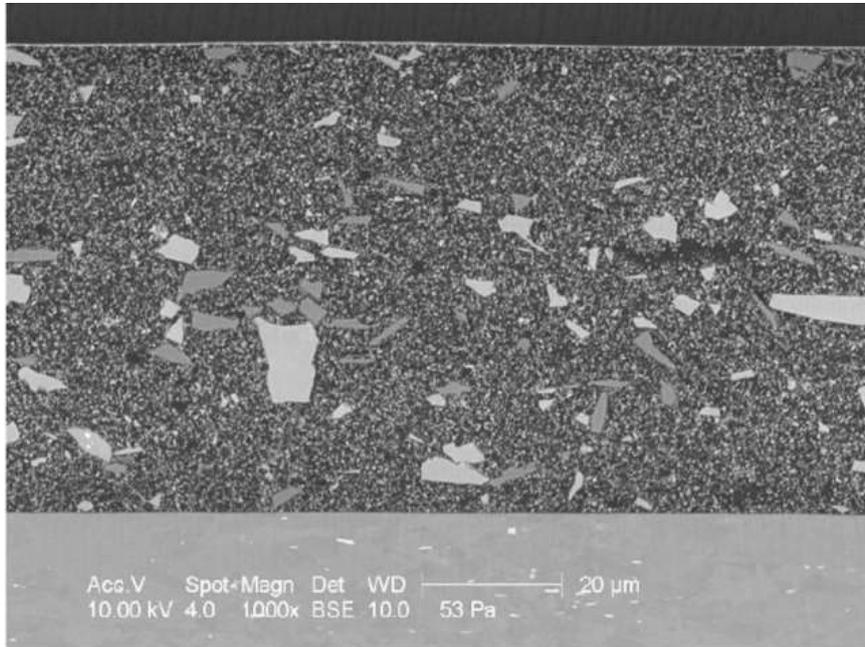


図 4.11 高熱放射タイプ①の塗膜断面 SEM 写真

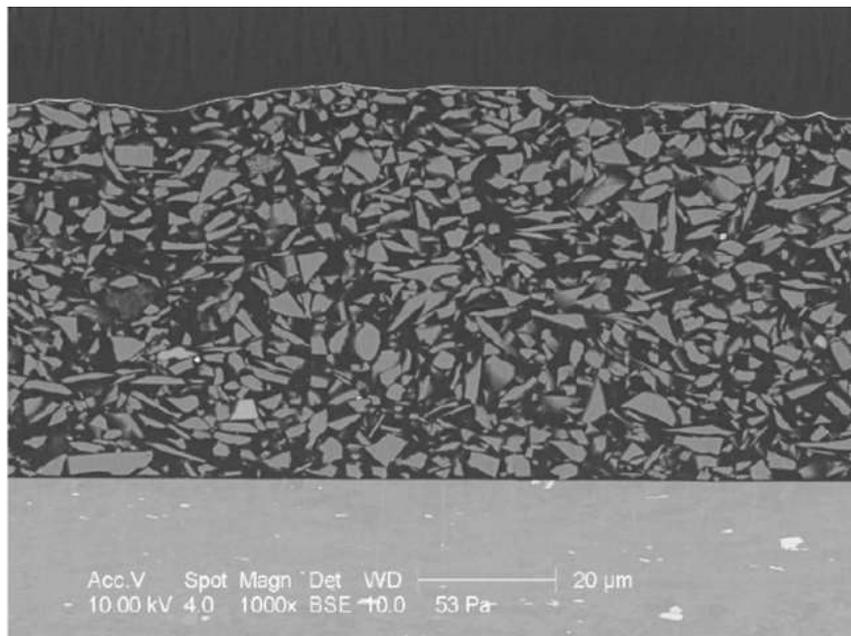


図 4.12 高熱伝導タイプ①の塗膜断面 SEM 写真

高熱放射タイプ①の無機フィラーは主成分が  $\text{CaF}_2$  であるが、広い範囲での輻射を効率よく行うために複数のフィラーを組み合わせで使用している。一方、高熱伝導タイプ①は塗膜自体の熱伝導性を向上に加えて、対流による熱移動効果も考慮し、表面の熱伝達係数を高めるために表面粗さを高めている。よって、それぞれの塗料に含まれる無機フィラーは、種類だけでなく、配合比率、粒径、形状も異なる。

### 4.3.2 風洞実験による放熱性能の確認（試験 1）

高熱放射タイプ①および高熱伝導タイプ①に、未塗装のものを比較材として加え、測定を行った。風に対してサンプルの向きが正面 0°、正面 45°、正面 90° の 3 パターンで測定を行っている。

図 4.13～図 4.18 に風洞実験の結果を示す。図 4.13、図 4.15、図 4.17 の風速と試験体温度の関係については、●が未塗装の試験体、■が高熱放射①の塗料を塗布した試験体、▲が高熱伝導①の塗料を塗布した試験体の温度を表している。風に対して 0°、45°、90°のいずれの角度も高放射タイプ①に比べて高熱伝導タイプの温度が低く、対流の効果が得られている。最も顕著な効果が得られたのは風に対して試験体を平行に設置した場合で（正面 90°）、風速 2 m/s 時の高熱伝導タイプ①と高熱放射タイプ①の温度差は 4.4°C、高熱伝導タイプ①と未塗装の温度差は 7.6°C であった。

無風状態では未塗装の試験体と比較して、高放熱タイプ①、高熱伝導タイプ①いずれも 40°C の温度差があった。これは、アルミニウムの熱放射率が 0.3 以下であるのに対して、放熱塗膜は 0.94～0.96 の熱放射率を持つことから輻射による放熱の効果が大きいと推測される。また、アルミニウムは、ターゲットとする 7.8～9.3 $\mu\text{m}$  の赤外波長域にほとんど吸収能（放射能）を持たない。

対流による放熱の効果を高めた高熱伝導タイプ①は、1～4 m/s の弱風時にその効果が見られたが、風速が大きくなるにつれて温度差は小さくなり、風速 10 m/s では高放熱タイプ①、高熱伝導タイプ①いずれも、未塗装との温度差はほとんどなくなった。

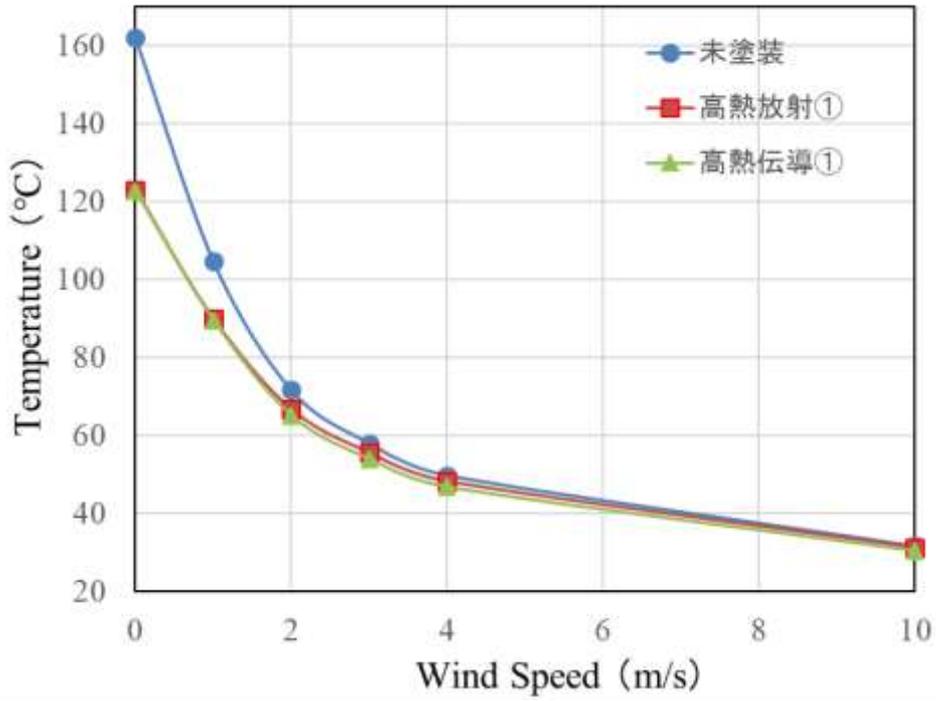


図 4.13 風速と試験体温度の関係 (正面 0°)

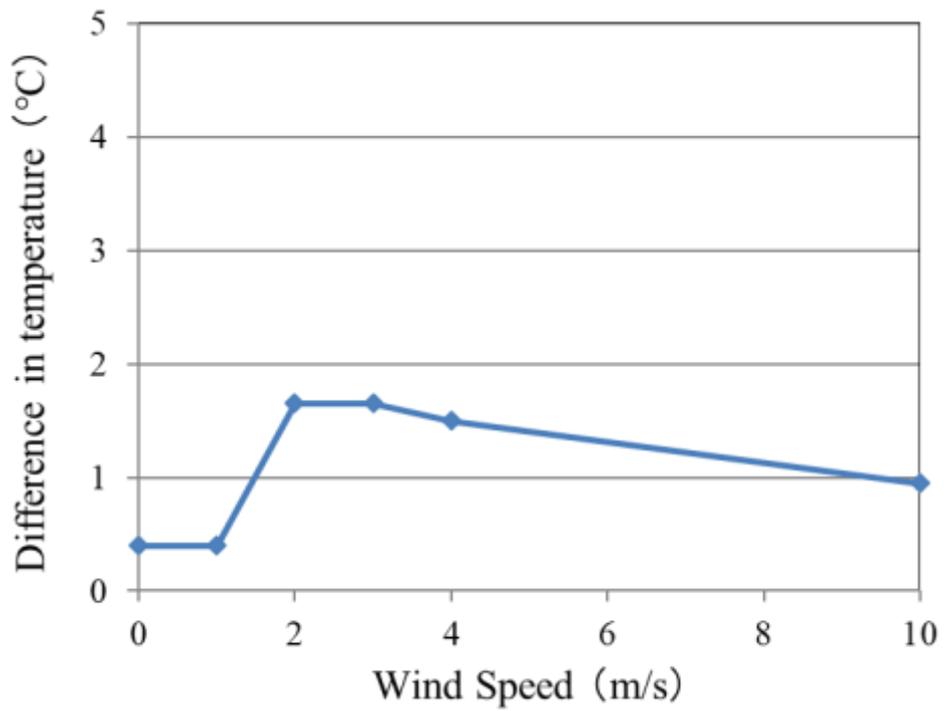


図 4.14 高熱放射タイプ①と高熱伝導タイプ①の温度差 (正面 0°)

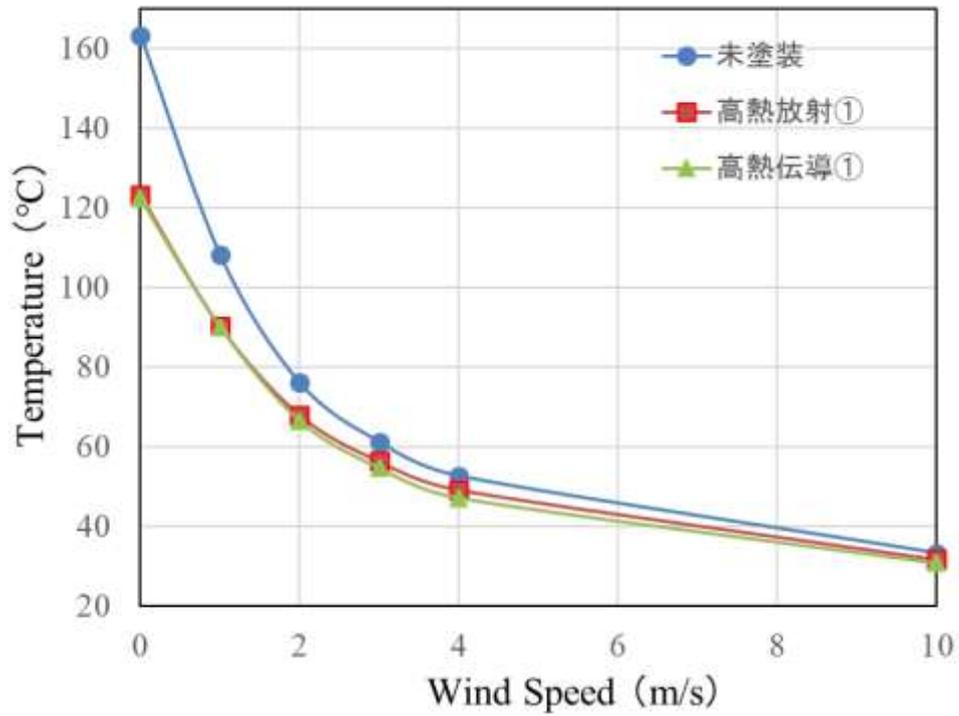


図 4.15 風速と試験体温度の関係 (正面 45°)

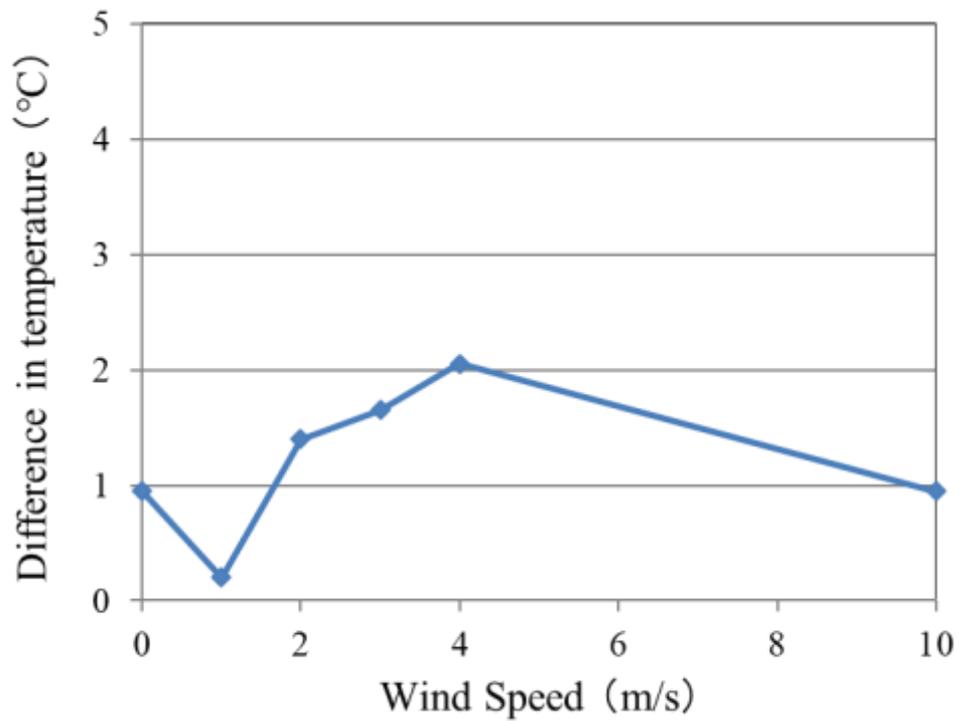


図 4.16 高熱放射タイプ①と高熱伝導タイプ①の温度差 (正面 45°)

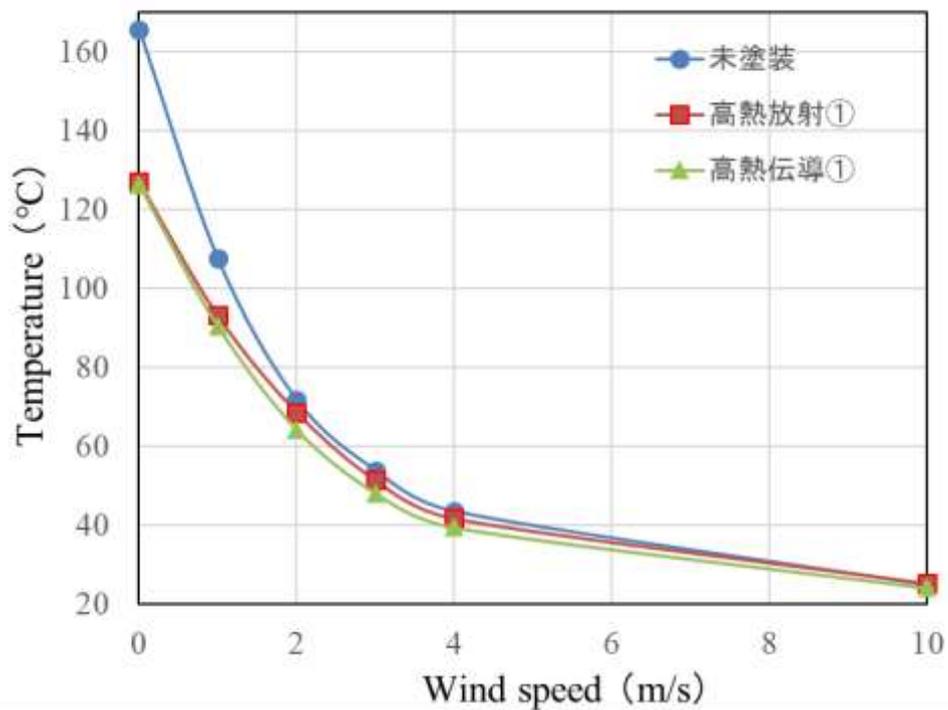


図 4.17 風速と試験体温度の関係（正面 90°）

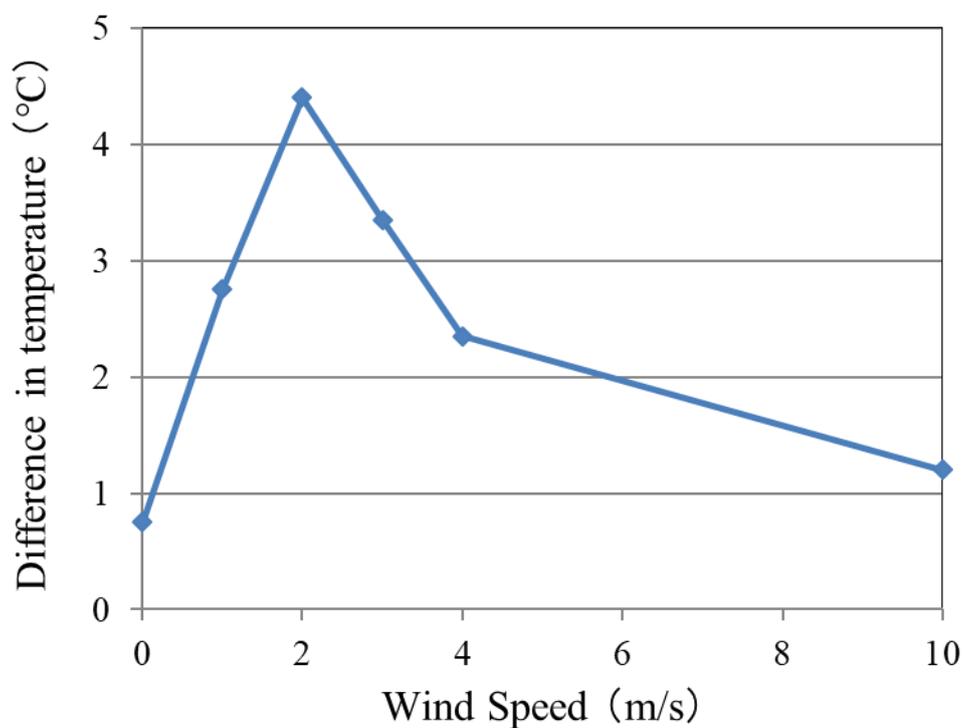


図 4.18 高熱放射タイプ①と高熱伝導タイプ①の温度差（正面 90°）

### 4.3.3 風洞実験による放熱性能の確認（試験 2）

試験 1 では風速 4 m/s 以下の領域で、高熱放射タイプの塗料と高熱伝導タイプの塗料に温度差がみられた。熱放射に加えて塗膜の熱伝導率と表面の熱伝達係数を高め、対流の効果を向上させることが試験体の温度上昇の抑制に有効との結果が得られたことから、試験 2 として、さらに塗膜の熱伝導率を高めた場合の効果について検証を行った。試験 1 と同じ熱伝導フィラー (SiC) を使用して、塗膜の熱伝導率を大幅に変えた 2 点の塗料を調製した。調製した塗料の詳細を表 4.2 に掲げる。

表 4.2 試験 2 に使用した放熱塗料の特性

項目	単位	高熱伝導タイプ①	高熱伝導タイプ②	高熱伝導タイプ③
フィラー主成分	—	SiC	SiC	SiC
フィラーの熱伝導率	W/m·K	170	170	170
フィラー含有率	Vol.%	60	40	75
粒子径	μm	1~5	5	5~10
塗膜の熱伝導率	W/m·K	2	1	10
塗膜の熱放射率	—	0.94	0.94	0.94

また、さらに効果の差を明確にすべく、試験 2 の試験体は試験 1 より大きめのサイズ（縦:95 mm、横:70 mm、厚さ:3 mm）とした（図 4.19）。また、ヒーターは試験 1 同様に熱伝導性のテープで固定したが、さらに試験体とヒーターの密着性を高めるため、試験 2 では図 4.20 に示すように試験体表面にネジ穴(直径:4 mm)を 4 ヶ所開け、アルミの押さえ板で固定することとした。また、ヒーター部分をポリスチレンのケースで囲い、ヒーター自身の熱放射と対流による温度低下の影響を極力小さくした。測定の向きは、試験 1 で最も温度差が大きかった風の方向に対して平行（正面 90°）とした（図 4.21）。

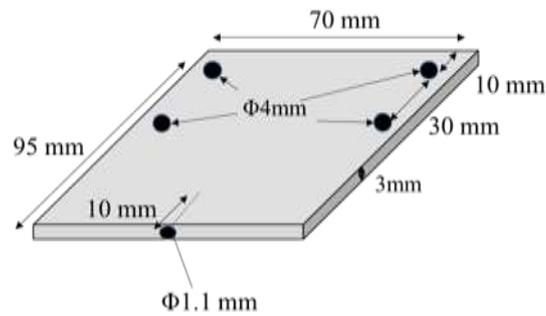


図 4.19 試験体寸法図

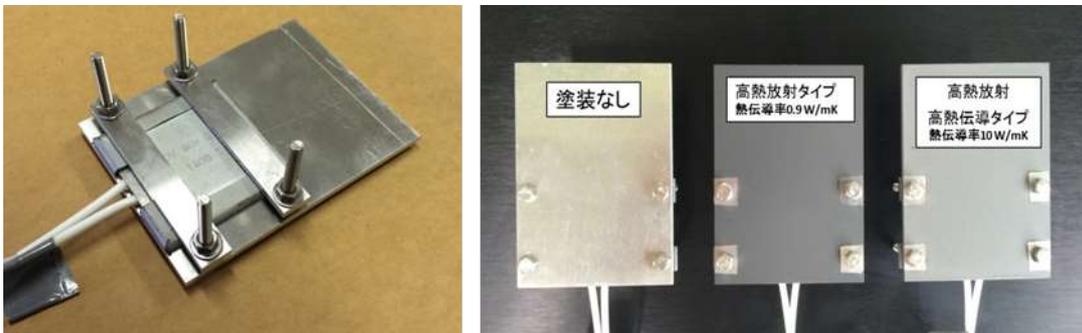


図 4.20 試験 2 に使用した試験体

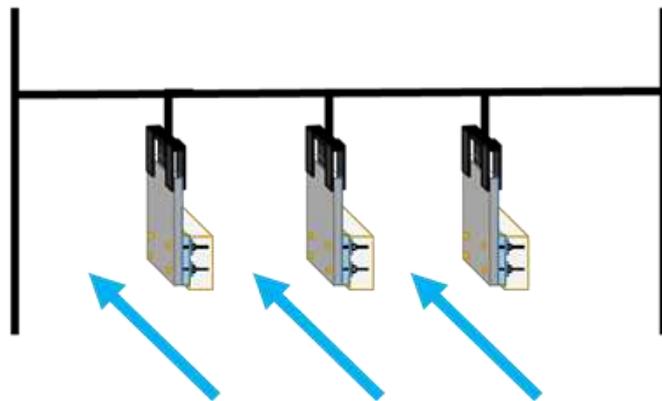


図 4.21 試験体の設置向きと風の方向

試験 2 の風洞実験の結果を図 4.22 に示す。●が未塗装の試験体、■が高熱伝導タイプ② ( $1\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) の塗料を塗布した試験体、▲が高熱伝導タイプ③ ( $10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) の塗料を塗布した試験体の温度を表している。図 4.23 に示すように、未塗装

の試験体に対して、高熱伝導②および高熱伝導③の塗膜を施した試験体は、風速 0~4 m/s の範囲で試験 1 と同様に、常に低い温度を示した。試験 1 と同じく、無風時が最も放熱塗膜の効果が大きく、未塗装と放熱塗装の温度差は 25 °C であった。無風状態では対流よりも輻射の効果が大きいと推測される。しかしながら高熱伝導②と高熱伝導③では熱伝導率が約 10 倍異なるにもかかわらず、無風の状態を含めて風速 0~4 m/s の範囲では顕著な温度の差はみられなかった。

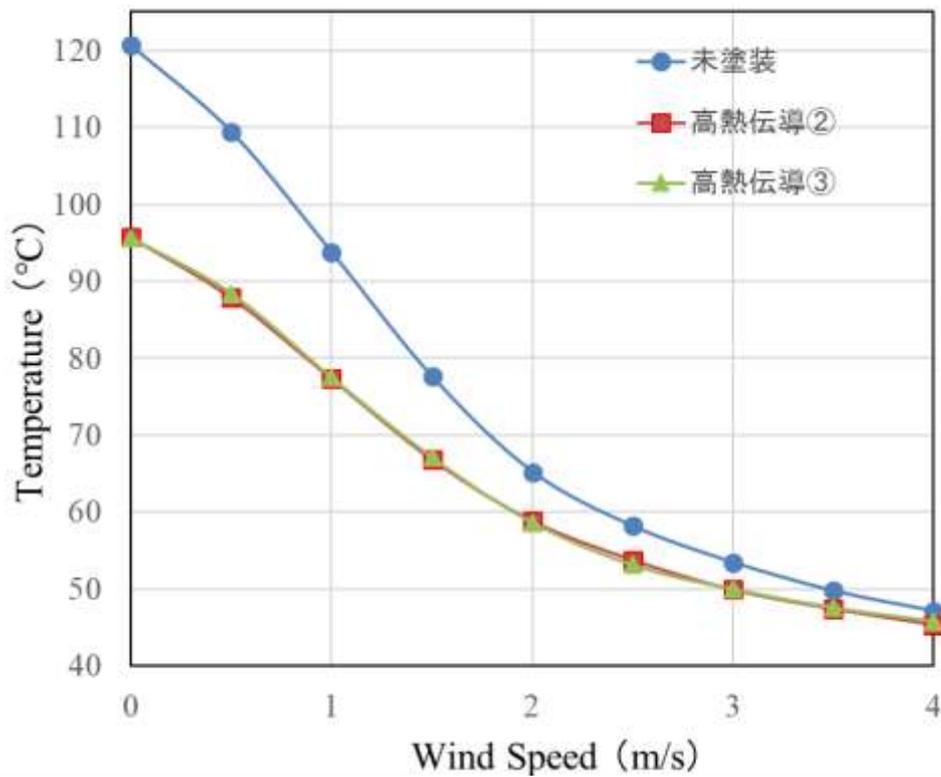


図 4.22 風速と試験体温度の関係

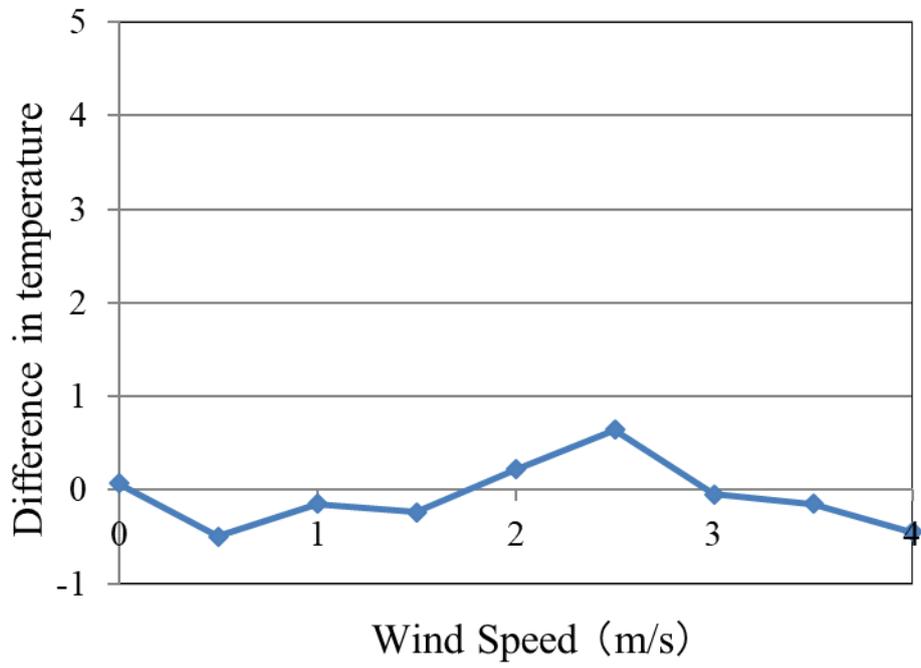


図 4.23 高熱伝導タイプ②と高熱伝導タイプ③の温度差 (②-③)

#### 4.3.4 放熱効果の検証

試験 1 と試験 2 で試験体のサイズや取り付け方法などに差異はあるものの、2つの実験の結果を合わせて検証すると以下の通りとなる。

無風状態ではいずれの実験でも、未塗装の試験体と比較して放熱塗膜を備えた試験体の温度は低かった。アルミニウムの熱放射率が 0.3 以下、放熱塗膜の熱放射率が 0.94~0.96 であることから、試験体表面の熱伝達係数よりも熱放射率に依存した結果と考えられる。対流による放熱の効果を狙って熱伝導率を高めた放熱塗料の効果は 1~4 m/s の弱風時に観測された。しかし、4 m/s 以上の強風時には顕著な差はみられなかった。また、塗膜の熱伝導率については、ある程度の値以上であれば(本実験では  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) 効果に大きな差はない結果となった。10 m/s 程度の強風になると、未塗装と放熱塗膜の差はほとんどなくなった。これは、対流による放熱効果が大きく、輻射による放熱はほとんど寄与しないことを示唆している。

対流による放熱は、固体と流体の界面の熱伝達のファクターに依存するが、自然対流に近い無風~弱風と、強制対流となる強風では分けて考える必要がある。また、無風~弱風では対流に加えて輻射の効果も考えなければならない。

## 4.4 結言

屋外に設置される太陽光モジュールを想定し、輻射による放熱に加えて対流による放熱効果も得られる放熱塗料を検討し、風洞による実証実験を行った。

2つの実験いずれも無風時は輻射の効果が大きく、放熱塗装を施した試験体の温度は未塗装の試験体よりも25~40℃低かった。しかし、熱放射と熱伝導のフィラーの違いによる効果差は見られなかった。無風時の輻射の効果は大きいものの、自然対流による効果も同等にあると推測される。

風速1~4m/sの弱風では、輻射の効果よりも対流の効果が上回る結果となった。しかしまだ媒体側のファクターよりも固体側のファクターが大きいため、最表面の放射率が低い未塗装のアルミ試験体よりも、放熱塗装を施した試験体の温度低下が依然大きいという結果になった。

風速4~10m/sでは、媒体側のファクターが大きくなるため、熱放射タイプと熱伝導タイプの差はほとんどなくなった。しかしこの時点でも、表面の熱放射率が低い未塗装アルミ試験体の温度は、放熱塗膜を備えた試験体の温度よりも高かったことから、輻射による温度低下効果はあると判断する。

風速10m/s以上では、著しく対流の効果が高いため、輻射の効果はほとんどなく、さらに固体側のファクターよりも媒体側のファクターが大きいため、固体表面の熱放射率、熱伝導率、熱伝達率はほとんど寄与せず、放熱塗膜の有無にかかわらず温度はほぼ一定となった。

放熱塗膜の熱伝導率については、一定以上の熱伝導率があれば、対流の効果は期待できるが、その効果は、熱伝導率の高さには依存しない、という結果になった。

## 4.5 引用文献

- [1] Kobayashi S, Miyano A, (1977) A Study of Heat Transfer Coefficient, AIJ, 258: 53-62
- [2] Narita K, Nonomura Y, Ogasa A (2000) Wind Tunnel Test on Convective Mass Transfer Coefficient on Urban Surface. J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ, 527: 69-76.
- [3] Isozaki M, Haji H, Nagano K, et al. (2001) Verification of Forced Convective Cooling from Overhead Conductors in Low Wind Velocity by Wind Tunnel Testing. T. IEE. Japan, 122-B: 782-788.
- [4] Ozaki A, Watanabe T, Ryu et al. (1990) Heat and Mass Transfer at Outside Surface of Buildings. AIJ, 407: 11-25.
- [5] Ozono S, Nishi A, Miyagi H, (2006) Turbulence Generated by a Wind Tunnel of Multi-Fan Type in Uniformly Active and Quasi-Grid Modes, J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 94: 225-240.

## 第5章 結論

電子機器や太陽光発電の熱対策のひとつとして 100 °C以下の領域における放熱塗料による熱放射の効果について検証した。

熱放射は、空間的に絶縁された状態でも電磁波によって熱を系外に放出できること、特別な機構や部品、追加のエネルギーを要せず対象物の表面に薄膜を形成するのみで放熱の効果が得られることで、対流の効果が低い密閉された空間での効果が期待される。また、太陽光発電も 100 °C 以下での放熱が必要とされることから、本研究では開放空間での効果についても検証した。

まず放熱塗料の設計では、赤外線放射特性を有する無機フィラーを含む放熱塗膜の冷却効果を 310~400 K の温度範囲で調べ、最適な無機フィラーとして  $\text{CaF}_2$  を選定した。 $\text{CaF}_2$  粒子は 9.4  $\mu\text{m}$  をピークとする 8.2~11.5  $\mu\text{m}$  の波長域に特徴的な赤外吸収特性を有し、特に電子機器の熱対策に重要とされる 373 K 以下の温度域の熱放射に寄与する。一方、8.0~10.3  $\mu\text{m}$  に明確な吸収ピークを持たない p-BN と SiC を含有する放熱塗膜は、400 K 以下の温度領域では  $\text{CaF}_2$  より放熱性能が劣る結果となった。いずれの塗膜も 0.94~0.96 の熱放射率を有するが、これは 8~14  $\mu\text{m}$  におけるエネルギー放射量から求められた値であり、特定の波長での放射率ではない。それぞれの温度には放射エネルギー密度の最大強度を有する特定の波長が存在するため、冷却効果は、FT-IR の測定で示される各々の無機フィラーの特徴的な赤外吸収スペクトルに依存する。冷却対象物の温度に合わせて、その波長に顕著な吸収を持つ物質を放熱フィラーとして選択することが放熱塗料のキーポイントとなることを実証できた。

次に、単結晶シリコン太陽電池モジュールのバックシートに、40~100 °C で顕著な熱放射特性を持つ  $\text{CaF}_2$  を含む放熱塗料を塗布し、その効果について検証し

た。放熱層を施した PV モジュールの温度は、放熱層のない標準の PV モジュールよりも終始低く、開放電圧 ( $V_{oc}$ ) は 0.1 V 高かった。放熱層を設けることにより、同一の環境下で PV モジュールの作動温度は 2~3°C 下がり、変換効率は向上する。熱放射の理論に基づいて対象物の作動範囲に適した放熱塗装を施すことにより、PV モジュールの出力を容易に向上できることを実証した。

さらに、屋外に設置される太陽光モジュールを想定し、輻射による放熱に加えて対流による放熱効果も得られる放熱塗料を検討し、風洞による実証実験を行った。無風時は輻射の効果が大きく、風速を徐々に上げると対流の効果が大きくなる。放熱塗料は風速 10 m/s 以下の弱風時に有効であり、モジュールの温度上昇を抑える効果があることを実証できた。

以上の検証により、電子機器や PV モジュールの温度上昇を抑制に有効な、輻射と対流の機能を持つ放熱塗料を確立した。

## 謝辞

本研究にあたり、社会人ながらも研究室に受け入れていただき、講義の調整、学会発表の手配から研究、論文執筆のご指導まで、何から何までお世話を賜りました西岡賢祐教授に心より感謝申し上げます。

研究を進めるにあたり、ご支援賜りました吉野賢二教授に感謝申し上げます。論文執筆にあたり、ご助言を頂きました太田靖之助教に感謝致します。

放熱塗料の設計に関して実験、解析などで多大なご協力を頂きました、ペルノックス株式会社 岩村栄治氏、両角靖孝氏に感謝の意を表します。

太陽電池モジュールと風洞実験による効果検証において、実験面で多大な協力を頂きました西岡研究室の野村圭氏、坂本一将氏に感謝の意を表します。

研究を進めるに当たって、学内の手続き等でお世話になりました西岡研究室の佐藤生未さんに感謝致します。