

—戦略プロジェクト研究—

ワイドギャップ半導体パワーデバイス導入による 高効率かつ小型・軽量化電力変換装置の開発 —熱輻射活用型放熱部材の開発—

環境・機能材料科 山口典男・永石雅基
(連携機関) 長崎県工業技術センター

要 約

炭化ケイ素を用いた電力変換用パワーモジュールの小型軽量化に貢献できる輻射を活用した放熱部材の開発を目的に、表面処理技術、放熱特性および放熱部材のマクロ構造と熱抵抗の関係などについて検討した。アルミニウム合金の中で汎用性の高い5052材およびフィンなどで使用される6063材に対し、輻射率が約90%となる処理条件を確立した。その放熱特性は約15Wの発熱量に対し、未処理のものより約20℃、アルマイトより3~6℃温度を下げる事ができた。放熱部材の構造において、対流熱抵抗は表面積に比例し低下するが、輻射熱抵抗は輻射熱の戻りが少ない構造を選択することで表面積あたりの放熱効果が高まることが分かった。

キーワード：放熱、熱輻射、対流、熱抵抗、表面処理、パワーデバイス

1. はじめに

近年の環境・エネルギー問題意識の高まりの中で、再生可能エネルギーを有効利用するための電力変換装置の高効率化が重要となってきている。電力変換素子の半導体として、変換効率の高い炭化ケイ素(SiC)が注目されている^{1, 2)}。また、SiCは既存の半導体であるシリコン(Si)よりも高温動作が可能、電力変換装置の小型化が可能であるといった特長などもある。

一方、電力変換時の損失は装置の発熱に繋がり、過度な発熱は装置の安定的な動作を阻害するため、放熱フィンや冷却用ファンにより冷却が行われる。熱が移動する機構は熱伝導、対流、熱輻射の3つがある。一般的な放熱フィン、素材として熱伝導の高いアルミニウム(Al)が用いられ、対流による熱移動を促進するため大型化し、空気との接触面積を大きくするなどの工夫がされている。さらには、空気の強制的な移動を行なうファンの併用も行われている。しかしながら、フィンやファンなどを装備することで、装置の体積は

大きくなり、既存の放熱手段では小型・軽量化には限界がある。これまで積極的に利用されてこなかった熱移動機構の「熱輻射」も利用することで放熱効率を改善でき^{3, 4)}、装置の小型・軽量化に貢献できると期待される。

アルミニウムは金属であるため輻射率は低く⁵⁾、そのままでは輻射による放熱が十分ではない。そこで、本研究ではアルミニウム表面をセラミックス化することで高輻射材とした。輻射を最大限活用した新規な放熱部材の開発を目的とし、各種アルミニウム合金の表面処理、輻射放熱処理を行なった放熱部材のマクロ構造、実装を想定した模擬電源における放熱特性などについて検討した。

2. 実験方法

2.1 表面処理

純アルミニウムの1050材、汎用性が高いアルミニウム合金5052材(Al-Mg系)および押し出し加工が可

能なアルミニウム合金6063材(Al-Mg-Si系)を専用処理液に浸漬し表面処理した。処理温度等の条件を変更し最適な処理条件を検討した。膜厚は、渦電流式膜厚計(サンコウ製、SWT-9000)を用い、放射率は分光放射率測定装置(日本電子製、JIR-E500)を用い評価した。なお、放射率は波長 $3.33\sim 20\ \mu\text{m}$ の積分値(積分放射率)とした。表面の生成物は、X線回折装置(PHILIPS製、PW3710)により同定し、走査型電子顕微鏡(日本電子製、JSM-7100F)により表面構造を観察した。

2.2 放射表面処理放熱板の放熱特性

放射表面処理した放熱板の放熱特性を図1に示す試作したアクリル製の放熱評価装置を用いて評価した。発熱源にはシリコンラバーヒーターを用い、後方からの放熱を防ぐために断熱材で覆った。シリコンラバーヒーターに直流安定化電源で15.44Wの電力を投入し、ヒーター(T_h)および放熱部材(T_s)の温度変化を測定した。なお、放熱特性の検討には、雰囲気温度(T_a)と各部位(T_h または T_s)の温度差(T_{h-a} または T_{s-a})を用いた。比較として、未処理のアルミニウムと市販の黒色アルマイト、白色アルマイトについても測定した。

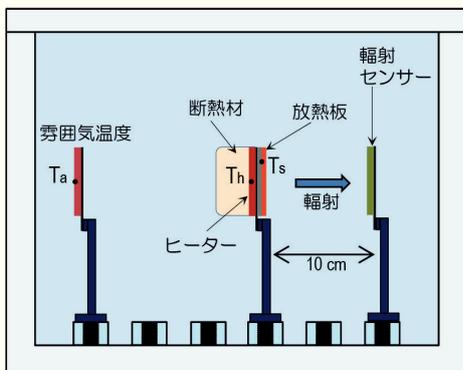


図1 放熱特性評価装置の概略図

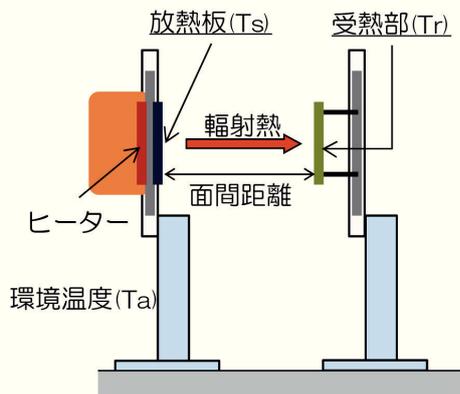


図2 受熱測定における放熱部・受熱部の配置概略図

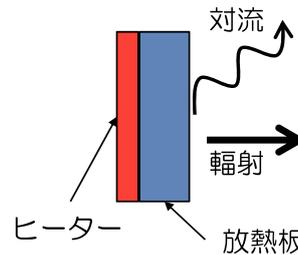
2.3 放射熱の周囲への影響

放射された熱が周囲に与える影響を検討するため、2.2で用いた放熱特性評価装置内に、図2に示すような治具を設置し、放熱板および受熱部の温度変化を測定した。このとき、放熱板および受熱部には、放射率が約90%(高)、約50%(中)、約3%(低)の3種類をそれぞれ用い、放熱部-受熱部の面間距離を0~10cmまで変化させた。なお、この時の投入電力は、11.7Wとした。

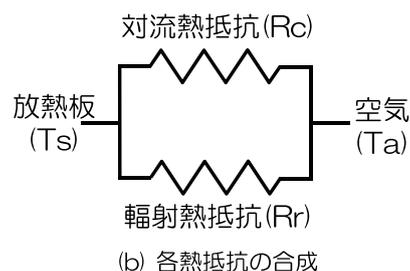
2.4 対流および放射熱抵抗の評価

対流および放射の熱抵抗を算定するために、放射率の異なる平板サンプルを2.2で用いた放熱評価装置を用い、大気圧下および減圧下(約1030 Pa)における熱抵抗を求めた。各熱抵抗は、投入電力に対する温度上昇の勾配より算出した。なお、投入電力は、大気圧下では1.4W, 3.7W, 7.3W、減圧下では0.6W, 1.8W, 3.0Wとした。温度上昇は評価装置内の雰囲気温度(T_a)とサンプル温度(T_s)の差(T_{s-a})とした。また、各温度は平衡となった際の5分間の平均温度とした。

大気圧下および減圧下でのサンプル表面からの放熱は、図3に示すように対流および放射により行われる。そこで、雰囲気圧力が対流の熱抵抗に反比例すると仮定すると、大気中(R_a)および減圧中(R_v)での熱抵抗は(1)式および(2)式のように示される。大気中および減圧中の実測データから、(1)式および(2)式を用いて、対流熱抵抗と放射熱抵抗を算出した。



(a) 放熱板表面からの熱移動



(b) 各熱抵抗の合成

図3 対流・放射熱抵抗の分離

$$R_a = \frac{R_r R_c}{R_r + R_c} \quad (1)$$

$$R_v = \frac{100 R_c R_r}{(R_r + 100 R_c)} \quad (2)$$

ここで、 R_a は大気中での実測熱抵抗、 R_v は減圧(約1030Pa)での実測熱抵抗、 R_c は大気中での対流熱抵抗、 R_r は輻射熱抵抗である。

2.5 放熱部材のマクロ構造と放熱特性

放熱部材のマクロな構造と放熱特性の関係を検討するために、図4に示すような種々の構造のサンプル(1050材)を作製し、輻射表面処理を行ない放熱特性の評価を行なった。放熱部材の大きさは、50×70×6mmで、中央の50×50mmに各種形状を加工した。放熱特性については、2.4で示したように大気中および減圧中での測定を行ない、対流および輻射の熱抵抗を算定した。

また、フィン構造におけるフィンの深さの影響について検討するために、フィンの深さが、最大38mmとなるサンプルについて、同様な測定を実施した。なお、フィンの間隔は4.5mm、フィンの厚みは2mmとした。比較として輻射表面処理を行っていないサンプルについても測定した。

2.6 模擬電源における放熱評価

本プロジェクトで想定している電力変換装置は500Wクラスであり、約10%が電力損失とした場合、発熱量は約50Wとなる。そこで、発熱量が50Wに対応できる放熱手段と輻射表面処理の効果について、図5に示す模擬電源を用いて評価した。発熱源となる半導体素子として、図6(c)に示すセラミックヒーターを

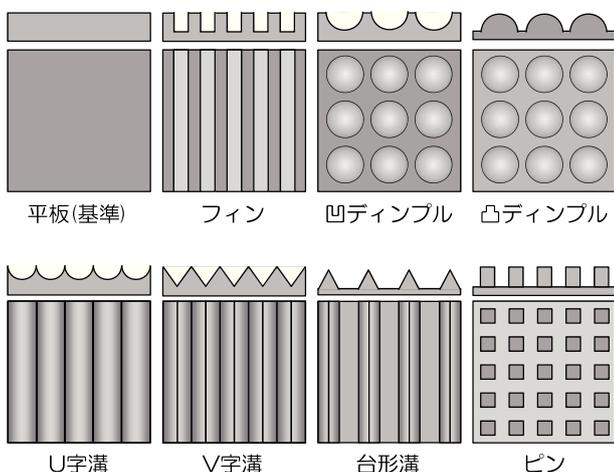


図4 マクロ構造の評価に用いた形状イメージ



1, 2 : 発熱部 7, 8 : 発熱部近傍筐体
3, 4 : 発熱部周辺 9 : 筐体内部
5, 6 : 発熱部対面 10 : 筐体外

図5 模擬電源による放熱測定

(a)模擬電源を設置したアクリルボックス
(b)模擬電源基板と測温箇所

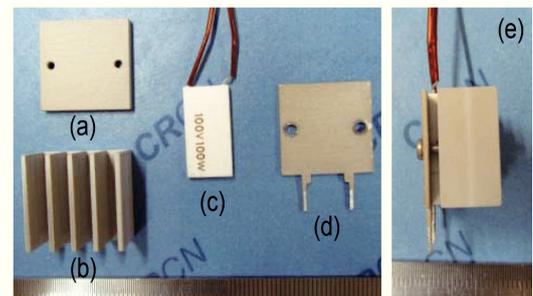


図6 模擬電源の発熱部と放熱部材

(a)放熱部材(平板) (b)放熱部材(フィン)
(c)セラミックヒーター (d)支持板
(e)部品b, c, dを組んだ放熱部

代用した。放熱部材には、表面処理を行なった平板(図6(a))または、深さ13mmのフィン(図6(b))を用いた。発熱部は、図5の①および②の位置に設置、①および②付近の筐体に直接固定(⑦および⑧の位置)の2条件について比較検討した。また、筐体の輻射表面処理の有無についても比較した。

3. 結果と考察

3. 1 輻射表面処理被膜の特性

各アルミニウムの表面処理前後の分光輻射率曲線を図7に示す。未処理の状態では10%以下と非常に低いですが、輻射表面処理することで、どのアルミニウム材においても、輻射率の著しい増加が確認され、積分輻射率は約90%となった。

5052材の表面に生成した被膜のX線回折パターンを図8に、SEM写真を図9に示す。生成物は、水酸化アルミニウム(Gibbsite、Bayerite)であった。太さ

約1 μ m、長さ約10 μ mの柱状結晶が表面全体を覆っており、それが入り組んだ多孔質状の組織を形成していた。

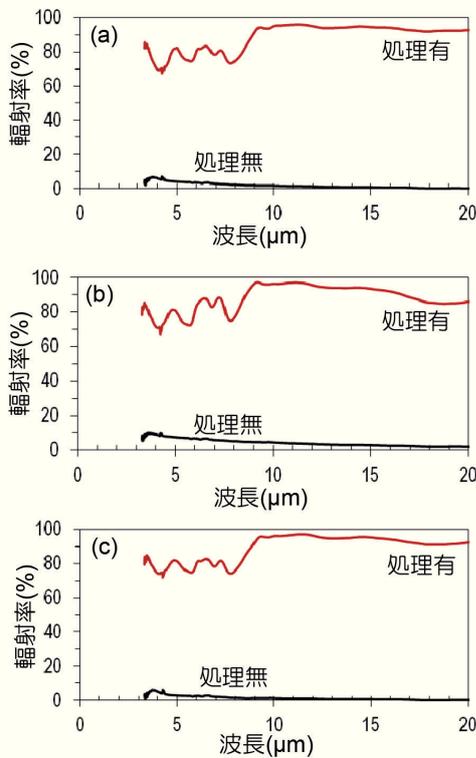


図7 表面処理されたアルミニウム合金の輻射率分光曲線
(a)1050材 (b)5052材 (c)6063材

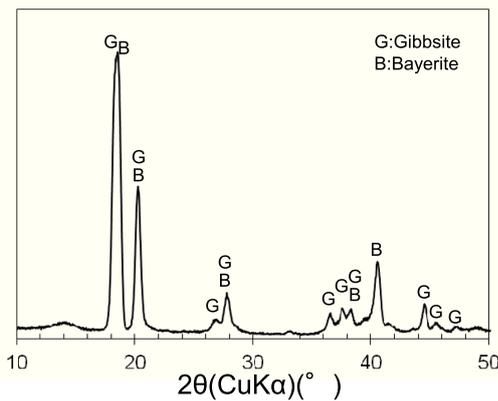


図8 表面処理された5052材のXRDパターン

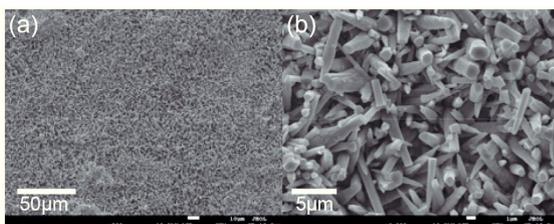


図9 5052材の表面処理皮膜のSEM写真
(a)表面組織の外観 (b)生成物の結晶形態

3.2 輻射表面処理材の放熱特性

シリコンラバーヒーターの加熱に伴うヒーター部の温度変化(T_{h-a})の例を図10に示す。また、温度が平衡に達した時点でのヒーター部および放熱部材の温度上昇の値を表1に示す。未処理サンプルでは輻射率が低いため、ヒーター部の温度上昇は188 $^{\circ}$ Cとなった。一方、輻射表面処理したサンプルは約168 $^{\circ}$ Cであり、表面処理することで、約20 $^{\circ}$ C温度を下げるのが可能となった。また、類似技術であるアルマイトと比べた場合、アルマイト(黒)より約3 $^{\circ}$ C、アルマイト(白)より約6 $^{\circ}$ C下げることが可能であり、輻射による放熱に優れる表面状態であることが確認された。また、放熱部材(T_{s-a})の温度低下についても、ヒーター部とほぼ同じ傾向となった。

3.3 輻射熱の周囲への影響

放熱板と受熱部の距離に対する放熱板の温度変化を図11に示す。放熱板の温度低下は受熱部の輻射率にかかわらず、放熱板の輻射率に最も影響されており、輻射率が高いものほど放熱しやすい傾向が示された。さらに、放熱板の輻射率が高い条件において、輻射率の高い受熱部との組み合わせ(グラフ中の青丸)が、放

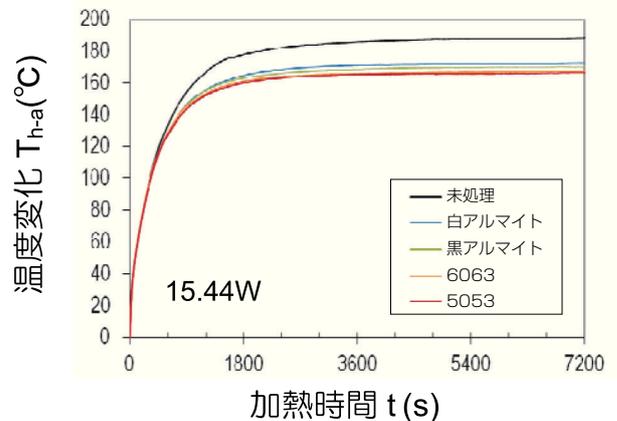


図10 各種材料の放熱試験における温度変化の一例

表1 各種部材の輻射率と放熱試験結果

サンプル	輻射率※ (%)	膜厚 (μm)	T_{h-a} (°C)	T_{s-a} (°C)
開発品				
5052材(処理有)	88	18.1	167.8	130.3
6063材(処理有)	88	16.7	167.9	131.4
市販品				
アルマイト(黒)	82	19.3	171.0	134.4
アルマイト(白)	72	7.4	173.8	137.3
比較				
未処理	3	-	188.1	152.5

※簡易型放射率計により測定

熱板の温度低下に最も効果的であった。輻射率と吸収率は等しいことから、輻射率の高い受熱部が、輻射熱を効率的に吸収したためであると考えられる。

また、放熱板の輻射率が低い(グラフ中の三角印)場合、受熱部の輻射率にかかわらず、放熱板と受熱部の間隔が狭い条件で温度が下がりやすく、離れるにしたがい温度が高くなる傾向が示された。輻射がほとんど起きない条件では、熱移動の主体が対流となるため、間隔が近い場合受熱部への熱移動が起きやすいが、離れることにより対流による受熱部への熱移動が起きにくくなったためであると推察された。

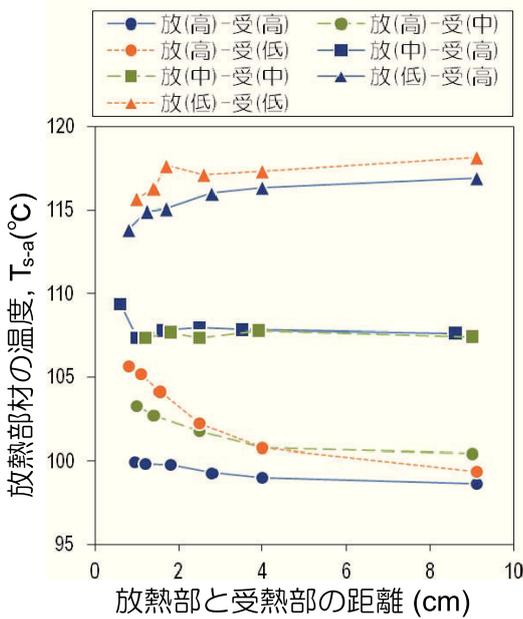


図11 受熱部との距離に対する放熱部材の温度変化

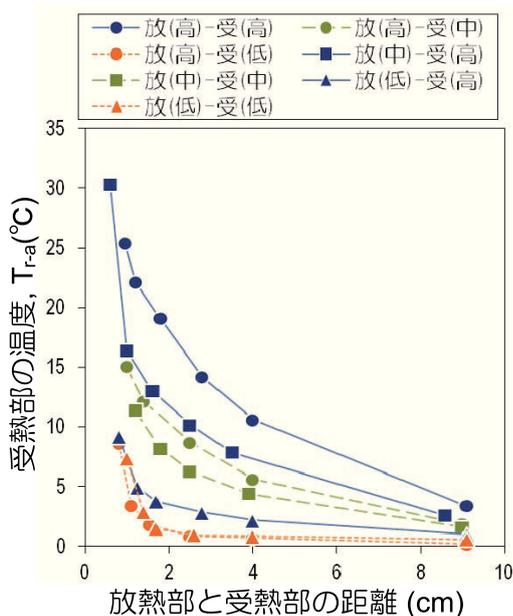


図12 放熱部からの距離に対する受熱部材の温度変化

次に、受熱部側の温度変化を図12に示す。どの組み合わせにおいても、放熱部と受熱部の距離が広くなるにつれて受熱部の温度は低下した。放熱部または受熱部のどちらか一方の輻射率が低い場合、受熱部の温度は上がりにくい傾向となった。どちらかの輻射率が低いことで、輻射熱の授受が起きにくい状態となっていることがわかった。また、両方ともに輻射率が高い場合、熱輻射の授受が大きく受熱部の温度が上昇する結果となった。

以上のことから、放熱部の温度は放熱部のみの輻射率に依存するが、受熱部の温度は、放熱部または受熱部の輻射率の小さい方に依存する傾向があることが明らかとなった。

3.4 対流および輻射熱抵抗の分離

輻射率の異なる平板サンプルの大気中および減圧中での熱抵抗およびそれらを基に算出した対流熱抵抗と輻射熱抵抗を表2に示す。また、対流・輻射熱抵抗の輻射率依存性を図13に示す。大気中および減圧中ともに輻射率の増加にしたがい、熱抵抗が減少し、放熱しやすくなっていることがわかる。輻射熱抵抗は輻射率に比例して減少しているが、対流熱抵抗は輻射率に関係なくほぼ一定の値となることが確認された。このことから、輻射表面処理による放熱特性の改善は、輻射によるものであると考えられた。

3.5 放熱部材のマクロ構造と放熱特性

各種マクロ構造における各熱抵抗を表3に、表面積比に対する対流熱抵抗と輻射熱抵抗を図14に示す。ディンプル(凹・凸)構造は、表面積が増加しているにもかかわらず、平板よりも大気中の熱抵抗が高くなり放熱特性が低下した。ディンプル構造の輻射熱抵抗は

表2 輻射率の異なる平板試料での各種熱抵抗

輻射率 (%)	膜厚 (μm)	熱抵抗 (°C/W)			
		大気	減圧 ^{※1}	対流 ^{※2}	輻射 ^{※2}
3	0	10.48	28.67	16.35	29.18
10	0	9.85	26.49	15.51	26.95
48	4	9.35	23.03	15.57	23.38
88	15	8.82	19.94	15.66	20.19
90	21	8.72	19.72	15.48	19.97
92	34	8.74	19.34	15.79	19.57
93	54	8.61	19.13	15.48	19.37

※1 雰囲気圧が約1030Paで測定

※2 大気中および減圧中で測定したデータを基に算出

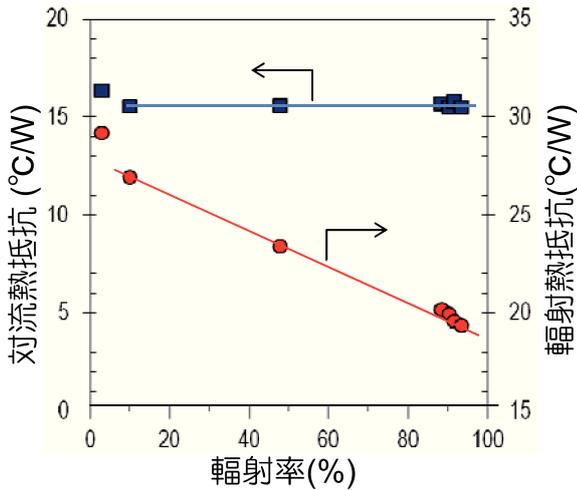


図13 放射率に対する対流および放射熱抵抗

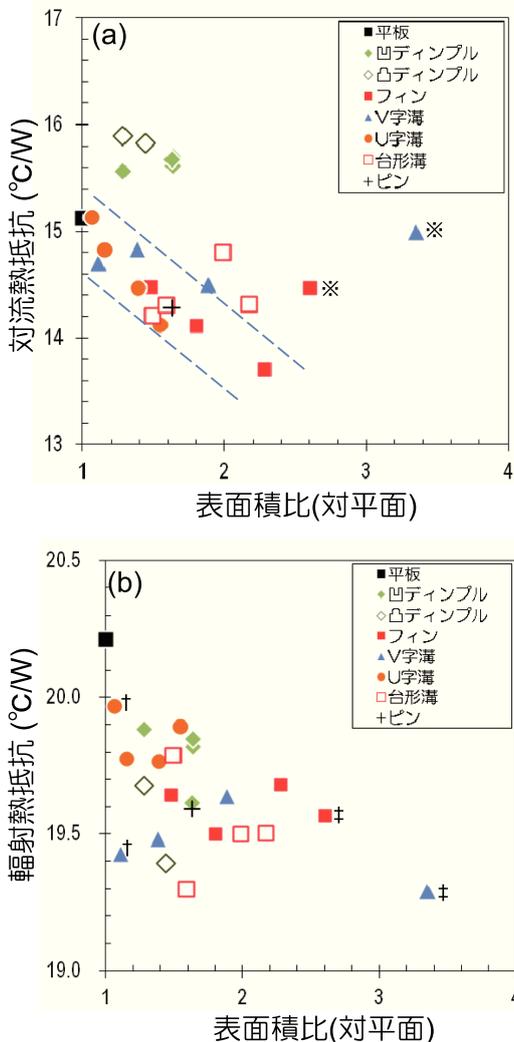


図14 放熱部材の表面積比に対する
(a)対流熱抵抗と (b)放射熱抵抗

平板よりも低下しているものの、対流熱抵抗が平板よりも高くなっていることが原因であることが示唆された(図14)。ディンプル構造は、ディンプル面の垂直

方向に熱放射し、放射熱の戻りも少なく、放射型放熱部材に有効であると当初考えたが、対流に対して不利な構造であることから、大気中での放熱部材としてディンプル構造は不相当であると判断された。

対流熱抵抗において、表面積比が約2.4付近までは、表面積比に比例し熱抵抗が下がり、ディンプル構造を除き、構造の形態によらず表面積を増やすことで、放熱特性を上げることが可能であることがわかった。ただし、フィン間隔等が極端に狭くなるような条件(図14(a)の※印を付した点)では、反対に対流による放熱特性が低下することも確認された。

放射熱抵抗において、単純に表面積比に比例するといった傾向は確認されない。しかしながら、†印を付した点では、わずかな表面積比の増加にもかかわらず放射熱抵抗の低下が大きい。すなわち、単位表面積あたりの放射熱抵抗減少率が大きい。このような†印を付した構造は、図15に示すような緩やかな構造であり、放射熱の戻りが非常に少ないと推察された。一方、‡印を付したフィンやV字溝は、図16に示すようにそ

表3 各種マクロ構造の熱抵抗

構造	形状	表面積 (cm ²)	熱抵抗(°C/W)			
			大気	減圧 ^{※1}	対流 ^{※2}	放射 ^{※2}
平板	平板	2500	8.65	19.94	15.12	20.21
	凹φ2.5-(18*18)	4090	8.73	19.57	15.61	19.82
	凹φ2.5-(12*12)	3207	8.73	19.63	15.57	19.88
	凹φ5-(9*9)	4090	8.77	19.60	15.70	19.85
ディンプル	凹φ10-(5*4)	4071	8.71	19.37	15.67	19.61
	凸φ2.5-(12*12)	3207	8.79	19.44	15.90	19.68
ディンプル	凸φ2.5-(15*15)	3604	8.72	19.16	15.83	19.39
	F-2-2-4	3700	8.33	19.38	14.48	19.64
フィン	F-4-2-4	4500	8.19	19.23	14.11	19.50
	F-7-2-4	5700	8.08	19.40	13.70	19.68
	F-9-2-4	6500	8.32	19.31	14.47	19.57
	V-4-25.6	2772	8.37	19.18	14.70	19.43
V字溝	V-4-43.8	3465	8.42	19.23	14.83	19.48
	V-4-58.0	4717	8.34	19.38	14.50	19.64
	V-4-72.6	8382	8.44	19.05	14.99	19.29
	U-2-24.6	2668	8.61	19.71	15.13	19.97
U字溝	U-3-16	2882	8.47	19.52	14.82	19.78
	U-5-9.8	3476	8.35	19.50	14.47	19.77
	U-6-8	3870	8.26	19.62	14.12	19.89
台形溝	T-10-5-1	4972	8.41	19.24	14.80	19.50
	T-5-10-6	3736	8.27	19.52	14.20	19.79
	T-10-5-2.5	5441	8.25	19.24	14.31	19.50
	T-5-10-7.5	3970	8.22	19.04	14.30	19.30
ピン	P-7-2-8	4068	8.26	19.33	14.28	19.59

※1 雰囲気圧が約1030Paで測定

※2 大気中および減圧中で測定したデータを基に算出

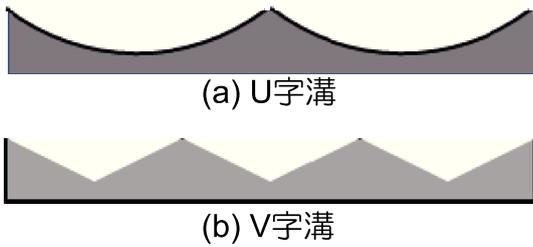


図15 図14の+を付した緩やかで輻射熱の戻りが少ない構造の例

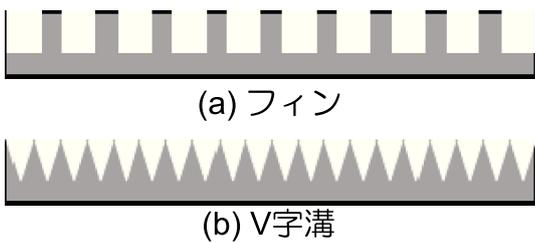


図16 図14の+した溝幅が狭く輻射熱の戻りが大きい構造の例

の溝の幅が狭く、輻射熱の戻りが大きかったため、表面積の増加に対する輻射熱抵抗の低下が十分ではなかったと推察された。

フィンの深さと輻射放熱特性について図17に示す。大気中での熱抵抗は、フィンの深さが18mm以上で表面処理の有無にかかわらずほぼ同じ値となった。深くなることで輻射熱が自己吸収されやすくなり、効率的な輻射放熱ができなかったためであると考えられた。

3.6 模擬電源における放熱評価

半導体素子を模擬したヒーターを基板上に設置した場合と筐体に密着させた場合のヒーターの温度上昇を図18に示す。基板上に設置した場合には、20Wで約200℃温度が上昇する。一方、筐体に密着させた場合には、約50Wでも140℃しか温度が上昇しないことが分かった。このことから、想定している50Wの発熱に対しては、筐体などの熱容量の大きな物を利用し、熱伝導により熱を逃がす必要があることが分かった。また、筐体の表面処理の有無における筐体内温度を図19に示す。筐体を表面処理することで、筐体からの輻射放熱が起き、筐体内部の温度を約7℃低下させることができた。このように、電源などにおける輻射放熱においては、放熱フィンだけでなく、筐体まで含めた輻射表面処理が有効であることが分かった。

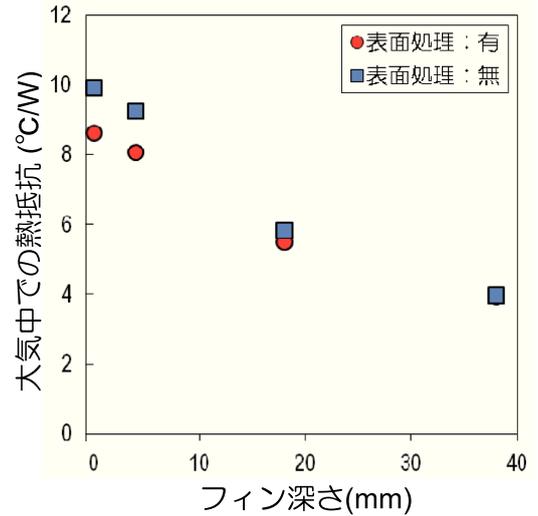


図17 フィンの深さに対する熱抵抗の変化

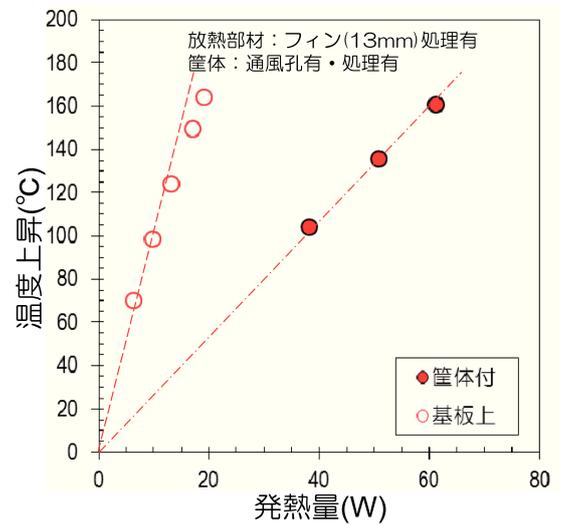


図18 発熱体の設置場所の違いによる発熱量に対するヒーターの温度変化

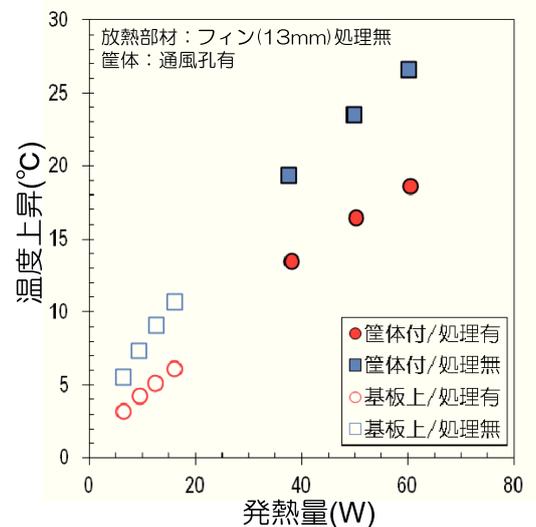


図19 筐体の表面処理の有無による筐体内の温度変化

4. まとめ

熱の移動手段における輻射に注目し、アルミニウム材の輻射表面処理、放熱特性、放熱部材のマクロ構造、模擬電源における放熱について検討し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 純アルミニウム1050材、アルミニウム合金5052材、6063材に対して輻射表面処理を行なうことで、柱状の水酸化アルミニウムが生成し輻射率が処理前よりも著しく高くなった。また、投入電力約15Wにおいて、未処理よりも約20℃の温度を下げる事ができた。また、類似技術であるアルマイトよりも3~6℃温度を下げる事ができた。
- (2) 放熱部材の温度低下は、主に放熱部材の輻射率に依存し、輻射率が高いものほど温度を下げる事ができる。また、放熱部材の輻射率が高い場合においても、受熱側の輻射率が高い方がより放熱効果が高まる事が分かった。
- (3) 大気中および減圧下での熱抵抗を基に、対流と輻射の熱抵抗に分離することが可能であった。放熱部材のマクロ構造の対流熱抵抗は、平板に対する表面積比が約2.5付近までは、それに比例し低下することが分かった。ただし、ディンプル構造は、対流熱抵抗が増加することが分かった。一方、輻射熱抵抗は、どの構造においても低下

することが分かったが、輻射熱が戻りやすい構造においては、表面積が増加しても輻射熱抵抗の低下はわずかであった。

- (4) 模擬電源による評価より、50W程度の発熱に対しては、発熱部を筐体などに直接固定するなどの対策が必要であることが確認された。また、筐体に対しても輻射表面処理を行なうことで、筐体内の温度を低下することができた。

文献

- 1) 四戸孝、SiCパワーデバイス、東芝レビュー、59(2)、49-53 (2004).
- 2) 荒井和雄、SiC半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略、シンセシオロジー、3(4)、259-271 (2010).
- 3) 特許第5083578号、遠赤外線高放射皮膜により冷却効果を高めたアルミニウム基材及びその製造法(2012).
- 4) 三浦拓巳、石田信行、西村元延、熱放射を利用した高放射率アルミナセラミックス平板ヒートシンク、エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集、26、200-202(2012).
- 5) 山口典男、各種素材の遠赤外線放射率の特徴、長崎県窯業技術センター研究報告、61、37-39(2014).