

—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・軽量の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
(連携機関) 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、表面処理技術の開発ならびに放熱に適した構造の検討を行なった。Al-Mg系、Al-Mg-Si系のアルミニウム合金に対し、輻射率80%以上となる表面処理を行なうことができた。また、最適な放熱構造として、対流による放熱能力の高いフィン形状に表面処理を行なうことが必要であり、熱抵抗が平板の約8.7°C/Wよりもさらに改善され、約8.1°C/Wと放熱特性の高い部材を作製できた。

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た。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といった特長などがある。

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などを装備し冷却が行われる。一般的に熱が移動する機構は熱伝導、対流、熱輻射の3つがある。これまでの多くの製品においては、熱伝導の高いアルミニウム(Al)を用い、対流による熱移動を促進するため空気との接触面積の大きなフィン等が用いられてきた。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、既存の手段では

小型・軽量化には適さない。これまで積極的な利用がなされていない熱移動機構の「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、そのままでは輻射による放熱が十分ではないことから、本研究ではアルミニウム表面をセラミック化することで高輻射材とし、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ている。平成26年度は各種アルミニウム合金の表面処理および、輻射放熱処理を行なった放熱部材の形状と放熱特性について検討した。

2. 実験方法

2.1 表面処理

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)を対象として表面処理を行なった。各アルミニウム合金を専用処理液に浸漬し表面処理した。処理温度等の処理条件を変更し最適

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、輻射率は分光輻射率測定装置(日本電子製、JIR-E500)を用い評価した。なお、輻射率は波長3.33~20μmの積分値(積分輻射率)とした。

2.2 対流および輻射熱抵抗測定

対流および輻射の熱抵抗を算定するために、輻射率の異なるサンプルを図1に示す試作したアクリル製の放熱評価装置を用い、大気圧雰囲気および減圧雰囲気(約1030 Pa)下で熱抵抗を測定した。投入電力に対する温度変化を測定し、その勾配より熱

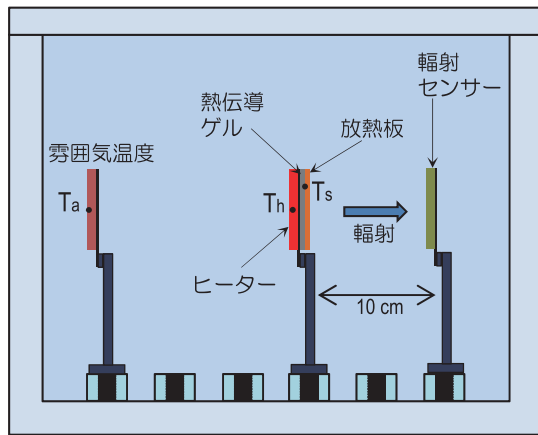
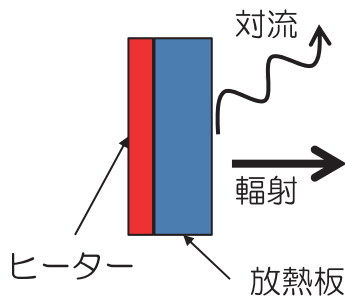
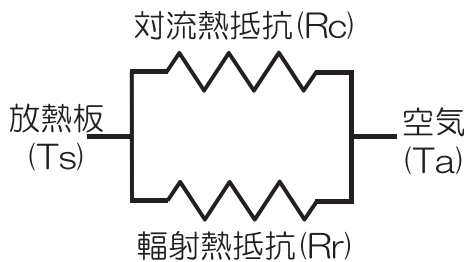


図1 放熱特性評価装置の概略図



(a) 放熱板表面からの熱移動



(b) 各熱抵抗の合成

図2 対流・輻射熱抵抗の分離

抵抗を算出した。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)とサンプルの温度(T_s)の差($T_s - T_a$)とした。温度が平衡となった際の5分間の平均温度を各温度とした。

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2に示すように対流および輻射により行われる。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、対流熱抵抗と輻射熱抵抗を算出した。

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

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

ここで、 R_a は大気中での実測熱抵抗、 R_v は減圧下(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。

2.3 放熱部材の構造と放熱特性

輻射放熱をより活かすための構造を明らかにするために、各構造の熱抵抗を求めた。測定を行った形状は、放熱部材で一般的なフィン構造と、輻射によ

表1 フィン構造の仕様

サンプル ID	フィン厚み (mm)	フィン間隔 (mm)	フィン深さ (mm)	フィン数	表面積 (mm ²)
TF001	2	15.3	4	2	3700
TF002	2	8.4	4	4	4500
TF003	2	4.5	4	7	5700
TF004	2	3.2	4	9	6500

表2 デンプル構造の仕様

サンプル ID	デンプル直径(mm)	デンプル深さ(mm)	デンプル数(個)	表面積 (mm ²)
TD005	2.5	1.25	18×18	4090
TD006	2.5	1.25	12×12	3207
TD007	5	2.5	9×9	4090
TD008	10	5	5×4	4071

る放出された熱が戻りにくいと考えられるディンプル構造を選択した。なお、放熱部材は50×70×6mmに表1および表2に示す形状を加工した。また、図3および図4に代表的な形状の模式図と写真を示す。熱抵抗測定は2.2で示した方法と同じとした。

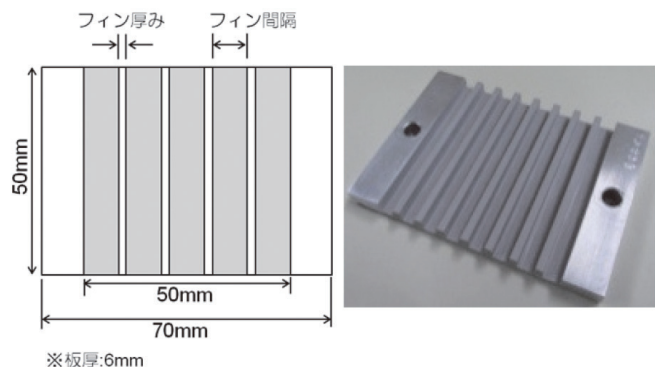


図3 フィン形状の概略図とテストピースの例

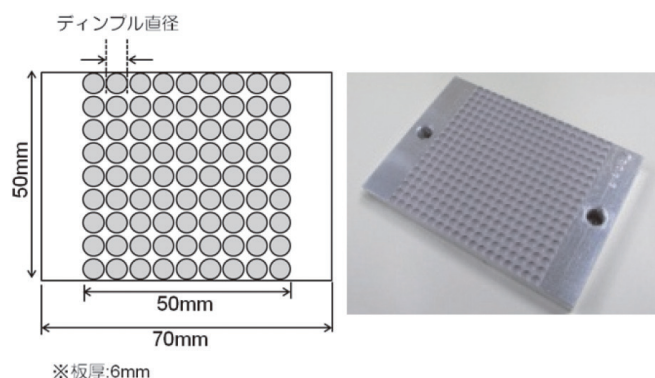


図4 ディンプル形状の概略図とテストピースの例

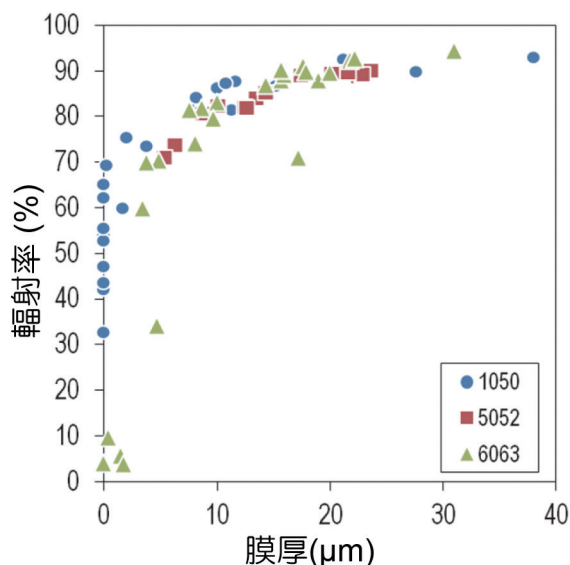


図5 表面処理されたアルミニウム合金の膜厚と放射率の関係

3. 結果および考察

3.1 膜厚と放射率の関係

各種アルミニウム合金での処理材の膜厚と放射率の関係を図5に示す。膜厚が増加するにつれ急激な放射率の増加が確認され、どのアルミニウム合金においても、膜厚10 μ mで放射率が約80%となっていることが分かる。また、膜厚10 μ m以上では、膜厚の増加に対し、放射率の増加は緩やかとなっている。各アルミニウム合金の放射率パターンを図6に示す。どの合金においても波長3~10 μ mで放射率の低下が確認され、合金の種類によらず同じ波長依存性を示していることが分かる。5052材および6063材ともに1050材と同じように放射率を改善する表面処理が可能であることが示された。

3.2 対流熱抵抗と放射熱抵抗

放射率の異なる平板試料の大気中および減圧中での熱抵抗を表3に示す。大気中および減圧中での熱抵抗を基に算出した対流熱抵抗および放射熱抵抗を表3および図7に示す。大気中および減圧中とも

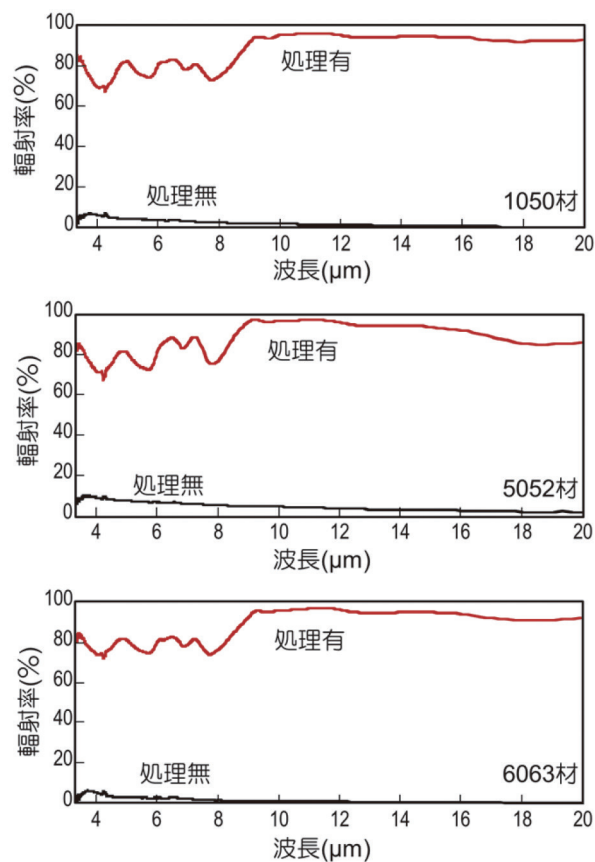


図6 表面処理されたアルミニウム合金の放射率分光曲線

に放熱部材の輻射率が高くなるにしたがい、熱抵抗が小さくなり、放熱しやすいことが分かる。

表面処理を行っていないサンプル(表3の一番上段のデータ:輻射率3%)を除き、対流熱抵抗は輻射率に関わらず、15.5°C/Wとほぼ一定となっていることがわかる。一方、輻射熱抵抗は輻射率に比例し低下していることがわかる。表面処理を行なうことで、対流による放熱がわずかに改善しているが、対流による放熱への影響は無いことが明らかとなった。このことから、表面処理による熱抵抗の減少は、輻射による放熱特性の向上が要因であることが確認された。

3.3 放熱部材の構造の違いによる放熱特性

平板、ディンプルおよびフィン構造の各熱抵抗を表4に示す。なお、対流熱抵抗および輻射熱抵抗は、2.2で述べた方法により算出した。輻射による効率的な放熱を期待したディンプルは、平板よりも熱抵

表3 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。

表4 放熱部材の構造の違いによる各種熱抵抗

種類	サンプル ID	熱抵抗 (°C/W)			
		大気	減圧 ^{※1}	対流 ^{※2}	輻射 ^{※2}
平板	T030	8.65	19.94	15.12	20.21
	TD005	8.73	19.57	15.61	19.82
ディンプル	TD006	8.73	19.63	15.57	19.88
	TD007	8.77	19.60	15.70	19.85
	TD008	8.71	19.37	15.67	19.61
	TF001	8.33	19.38	14.48	19.64
フィン	TF002	8.19	19.23	14.11	19.50
	TF003	8.08	19.40	13.70	19.68
	TF004	8.32	19.31	14.47	19.57

※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。

抗が高くなり、大気圧雰囲気下で使用する放熱部材としては適していないことが分かった。ディンプルの輻射熱抵抗は、予想通り平板よりも低くなっているものの、対流熱抵抗が非常に高くなっており、対流による放熱が起きにくい構造であることが分かった。一方、フィン構造は、今回比較した中で最も大気中での熱抵抗が低くなり、フィンに輻射放熱処理を行うことが有効であることが確認された。この要因としては、対流熱抵抗および輻射熱抵抗ともに、平板よりも低くなっており、対流と輻射が効果的に作用していることが分かった。

4. まとめ

アルミニウムの表面処理を行なうことで、輻射による放熱特性について検討し以下のことが明らかとなった。

- (1) アルミニウム合金 5052 材および 6063 材に対しても表面処理でき、約 10μm 以上の膜厚により輻射率は 80% 以上となった。
- (2) 大気圧下と減圧雰囲気での熱抵抗測定を行なうことで、対流および輻射の熱抵抗を算出できた。輻射表面処理を行っても対流による熱抵抗はほとんど変化せず、輻射が有効に作用していることが確認された。
- (3) 放熱部材としての構造として、輻射だけでなく対流による放熱特性を十分に考慮する必要があり、フィン形状に、輻射表面処理を行なうことで、熱抵抗の低い部材を作製することができた。

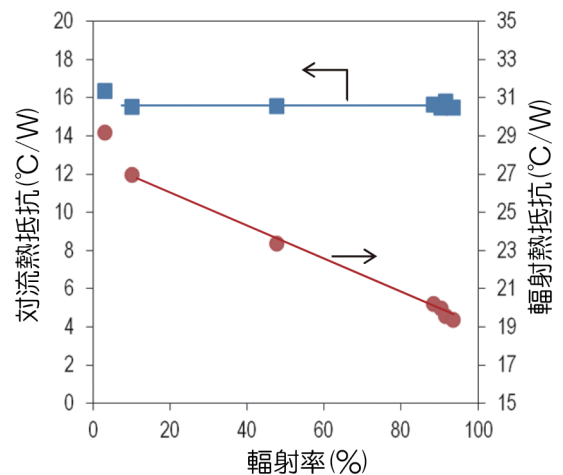


図7 輻射率に対する対流および輻射熱抵抗

参考文献

- 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).

付記

本研究は、長崎県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・軽量の電力変換装置の開発」の一部として行なったものである。