

技 術 論 文

溶射法を用いて作製した熱電変換モジュールの端面形状と熱伝導との相関について

Correlation Between Heat Conduction and Section Shape of Thermoelectric Conversion Module Made by Thermal Spray Method



技術開発センター
基盤技術開発室 係長
増住 大地
Daichi Masuzumi



技術開発センター
基盤技術開発室 室長
野村 大志郎
Daishiro Nomura



技術開発センター
センター長付 係長
志賀 真
Makoto Shiga



技術開発センター
センター長
博士(工学) 永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi

要 旨

熱電変換モジュールの発電性能は、モジュールに掛かる温度差の大きさに影響される。本研究では、熱電変換モジュールの形状について、モジュールの端面形状とモジュールに掛かる温度差との相関を調査した。

結果として、熱源とモジュール端面との距離が長くなると両者間の温度差が大きくなることを確認した。また、加熱面および冷却面とモジュールとの接触面積比がモジュール全体に掛かる温度差に影響を及ぼすことが確認できた。

モジュールと熱源間に微小空間が存在する場合、熱源からの熱伝達の低下が確認された。モジュール端面の研磨によって空間を少なくした結果、モジュール全体にかかる温度差に 1.6 倍の向上が確認された。

Synopsis:

The power generation performance of thermoelectric conversion module is influenced by the degree of the temperature difference to the module. In this study, we investigated relationship between the temperature difference to the module and the section shape of modules for the thermoelectric conversion module.

As a result, it was confirmed that the temperature difference increased with increasing distance of the heat source and the module end face. Moreover, we confirmed that the temperature difference across the module was affected by the contact area ratio between heating surface and cooling surface and the module.

The presence of small space between the heat source and the module reduced heat transfer from the heat source. We confirmed that the temperature difference was improved 1.6 times when the space is reduced by polishing of the module section.

1. 緒言

2015 年に行われた、気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21 パリ会議) において、わが国は気候変動対策の鍵として、「エネルギー・環境イノベーション戦略」を策定、革新的技術の研究開発の強化を発表した。それに先立ち、2013 年より、再

生可能エネルギーに関して、導入の積極的な推進を行ってきた。そのうちの 1 つ、熱から電気を回収する熱電変換技術は、未利用エネルギーを有効活用し、温室効果ガスの排出を低減する有力な選択肢として期待が高まっている^{1),2)}。

以前の報告では、アルミナ基板に溶射した素子に

ついて、再加熱処理が及ぼす溶射素子の組成への影響を報告した³⁾。現在、素子を溶射した基板を貼り合せて接続を行い、モジュールの作製をおこなっている (Fig.1)。しかし、貼り合わせの際に受熱部分の端面が平面にならず、接触部に微小な空間が発生する。モジュールの端面に存在する粗い表面や微小空間は断熱材として働き、熱移動に影響を与える原因となる⁴⁾。熱電変換の発電性能は温度差に大きく依存し、その性能を十分に生かすためには、熱源または冷却部と素子との間でスムーズな熱移動が必要である。従って、微小空間の存在は熱移動の障害につながり発電性能低下を引き起こす。しかし、その形状および空間部の距離と熱移動の相関性は明確ではない。

そこで本研究では、基板を貼りあわせた形状の熱電モジュールについて、その貼り合せ形状とモジュールに掛かる温度差について、調査したので報告する。

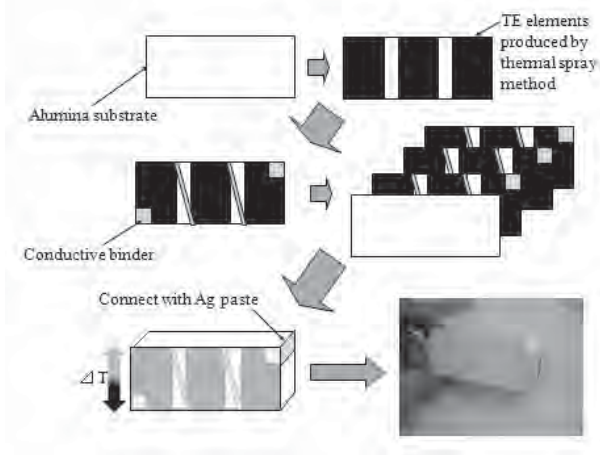


Fig.1 Image of manufacturing for thermoelectric modules

2. 実験方法

試験は、 $25 \times 60 \times 0.3\text{mm}$ のアルミナ基板 (株式会社フォノン明和製) を用いて行った。アルミナ基板 10 枚を貼り合せ、試験用モジュール (フラット型) を作製した。併せて、貼りあわせの際に貼り合せ位置をずらして形状を変えたモジュールも作製した (Fig.2)。ずらす長さはそれぞれの形状で 1mm とした。

それぞれのモジュールの測定ポイント (Fig.2 の P1~P3) に K 型熱電対 (グラフテック株式会社製) を伝熱セメント (坂口電気株式会社製) を用いて取り付けた。熱電対を取り付けたモジュールの P1 側をホットプレート (以下 HP と記す) により加熱し、片一方を水冷治具により冷却した。ホットプレート及び水冷治具は共に、表面のバフ研磨を行い、それ

ぞれの表面粗さが熱移動に影響しないように処理した。ホットプレートはコントローラー (株式会社河合電器製作所製) 操作により 700°C に温度調整を行い、昇温速度は $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 、定常状態に入るまで加熱を行い、温度の測定を行った。

また、フラット型に関して、#150 のダイヤモンドパッドで片面あたり 1 時間の研磨を行い、モジュール端面を平滑化させたときの温度測定も併せて行った。

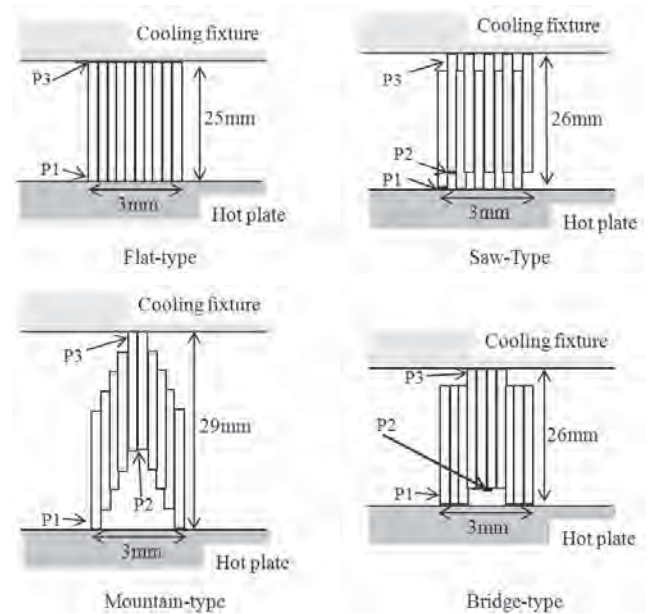


Fig.2 Schematic diagram of module edge shape

3. 結果

3. 1 HP と P2 の温度測定結果

各型のモジュールにおける、HP と P2 の測定結果および 2 点間の温度差を Table 1 に示す。鋸型 (Saw-type) モジュールの温度差は 200.3°C 、山型 (Mountain-type) モジュールの温度差は 329.8°C 、箱型 (Bridge-type) モジュールの温度差は 215.3°C であった。

Table1 Results of temperatures measurement between HP and P2 for each type of module

| Module type | $T_{\text{HP}}/^\circ\text{C}$ | $T_{\text{P2}}/^\circ\text{C}$ | $T_{\text{HP}}-T_{\text{P2}}/^\circ\text{C}$ |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Saw-type | 704.7 | 504.4 | 200.3 |
| Mountain-type | 706.1 | 376.3 | 329.8 |
| Bridge-type | 700.0 | 484.7 | 215.3 |

3. 2 P2 と P3 の温度測定結果

各型のモジュールにおける、P2 と P3 の測定結果および 2 点間の温度差を Table 2 に示す。鋸型モジ

ユールの温度差は 266.3℃、山型モジュールの温度差は 185.6℃、箱型モジュールの温度差は 143.8℃であった。

Table2 Results of temperatures measurement between P2 and P3 for each type of module

| Module type | TP2/°C | TP3/°C | TP2-TP3/°C |
|---------------|--------|--------|------------|
| Saw-type | 504.4 | 238.1 | 266.3 |
| Mountain-type | 376.3 | 190.7 | 185.6 |
| Bridge-type | 484.7 | 340.9 | 143.8 |

3. 3 P1 と P3 の温度測定結果

各型のモジュールにおける、P1 と P3 の測定結果および 2 点間の温度差を Tabl3 に示す。鋸型モジュールの温度差は 332.4℃、山型モジュールの温度差は 318.1℃、箱型モジュールの温度差は 261.0℃であった。

Table3 Results of temperatures measurement between P1 and P3 for each type of module

| Module type | TP1/°C | TP3/°C | TP1-TP3/°C |
|---------------|--------|--------|------------|
| Saw-type | 570.5 | 238.1 | 332.4 |
| Mountain-type | 508.8 | 190.7 | 318.1 |
| Bridge-type | 601.9 | 340.9 | 261.0 |

3. 4 フラット型 (Flat-type) の温度測定結果

フラット型モジュールの測定結果を Table4 に示す。HP と P1 との温度差は 165.1℃、P1 と P3 の温度差は 253.1℃であった。

Table4 Table showing result of measuring temperatures of each point for flat-type module

| Module type | T _{HP} /°C | TP1/°C | TP3/°C | TP1-TP3/°C |
|-------------|---------------------|--------|--------|------------|
| Flat-type | 703.7 | 538.6 | 285.5 | 253.1 |

4. 考察

4. 1 HP と P2 間の距離と温度差との関係

HP とモジュールの接触部、および P2 点との直線距離 L (Fig.3)と両者間での温度差についてまとめたグラフを Fig.4 に示す。両者間の距離と温度差については、直線の相関関係が確認された。定常熱伝導に関するフーリエの方程式を式 (1) に示す。

$$Q = \Delta T \times k \times A / L \dots (1)$$

ここで、 Q : 伝熱量 (W) ,
 ΔT : 温度差 (K) ,
 k : 熱伝導率 (W/m·K) ,
 A : 断面積 (m²) ,
 L : 長さ または 厚さ (m) である。

アルミナの熱伝導率は 32W/m·K、空気の熱伝導率は 0.0709W/m·K であるため、式 (1) より、鋸型に関して、アルミナによる伝熱量はおよそ 110.77W、空気による伝熱量は 0.26W となり、HP からの熱移動に関して、基板であるアルミナを通じた伝熱が大きなファクターを占めることが分かる。そのため、加熱面とモジュールとの間に空隙が存在する場合、基板を通る形で熱伝導が行われるため、見た目以上に熱移動距離が長くなると考えられる (Fig.5)。

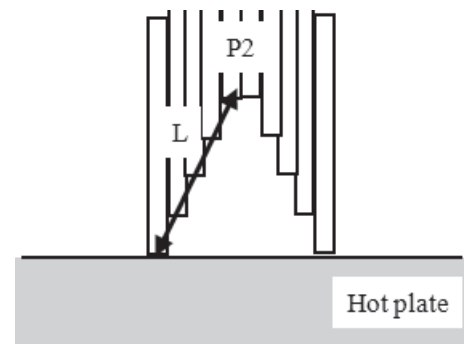


Fig.3 Schematic diagram of the linear distance between two points

そのため、モジュールの加熱側を高温にするにはモジュールと熱源間に存在する微小空間を無くし、実際の伝熱長さを短くすることが重要であると考ええる。

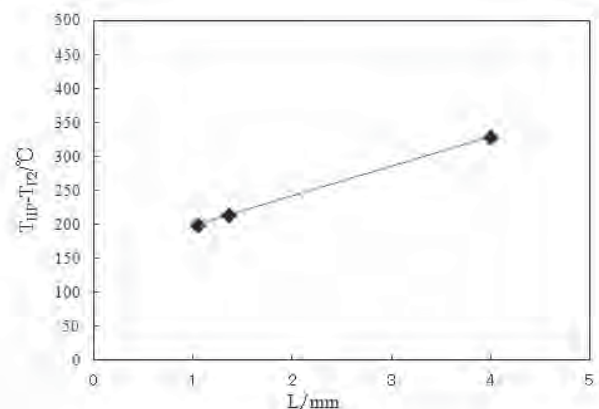


Fig.4 Result showing relationship between straight-line distance L and temperature difference

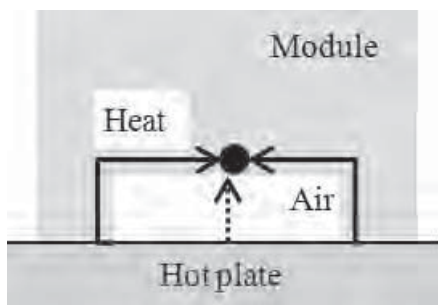


Fig.5 Schematic diagram showing process of heat transfer

4. 2 P2 と P3 の 2 点間における、鋸型と橋型との温度差の比較

鋸型モジュールと橋型モジュールについて、2点間の温度差についてまとめたグラフを Fig.6 に示す。2つの型は熱源と冷却部への総接触面積は同じであるが、違いとして、熱源および冷却部とモジュールとの接触面積比が挙げられる。鋸型の接触面積比が高温側：低温側=1:1 なのに対し、橋型は 3:2 と低温側の面積が小さい。このことから、熱源側の接触面積に対して冷却側の接触面積が小さいときに温度差が低下すると思われる。これは、高温側と低温側との接触面積の違いによる入熱量および放熱量の変化によるものと考えられる。

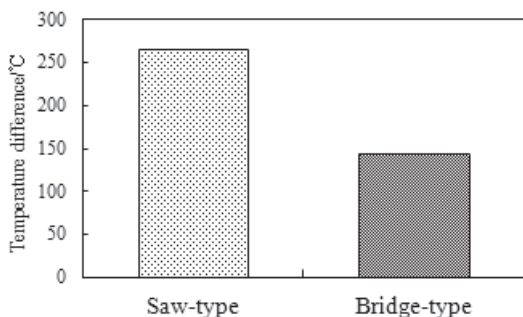


Fig.6 Result showing temperature difference of saw-type and bridge-type module

4. 3 フラット型モジュールと鋸型モジュールに掛る温度差の比較

フラット型と鋸型のモジュールについて、モジュールに掛かる温度差(P1/P3)を Fig.7 に示す。接触面積比 (低温側面積/高温側面積) が同じである鋸型のモジュールの 332.4°C と比較して、フラット型のモジュールは 251.6°C であり、温度差は小さい結果となった。これは、Fig.8 から分かるように、フラット型モジュールの貼り合わせの際、接触面に発生する微小空間により、実際の接触面積が大きく減少しているからだと考えられる。

モジュールとホットプレートとの間に空気層が

存在すると仮定し、HP-P1 間の温度差および式 (1) より計算を行ったところ、およそ 0.104mm³ の空気層が含まれていることが分かった (6,7)。

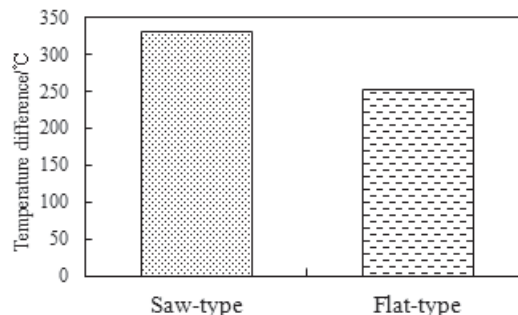


Fig.7 Result showing temperature difference of saw-type and flat-type module

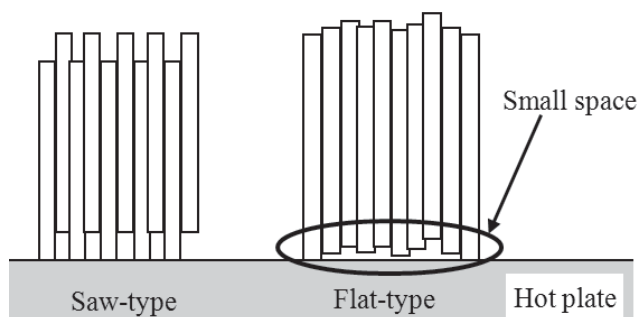


Fig.8 Schematic diagram of actual contact of the module

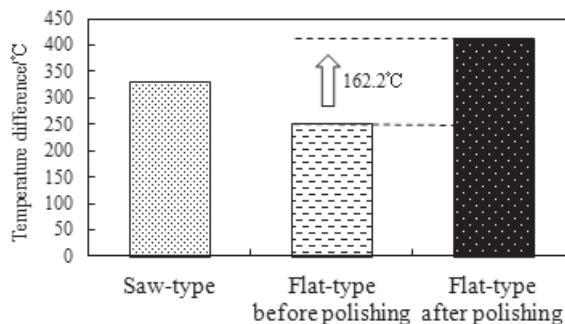


Fig.9 Result showing temperature difference of saw-type and flat-type module before and after polishing

4. 4 研磨によるモジュール端面の平滑化

フラット型モジュールの端面を研磨することで、微小空間の狭小化を試みた。平滑化した際の温度差について、研磨前および鋸型と比較した結果を Fig.9 に示す。ダイヤモンドパッドでの研磨により、モジュールの表面の平均粗さは研磨前の Ra=74 μm から Ra=22 μm まで平滑化されてい

た。研磨前と比べ、研磨後の場合でのモジュールに掛かる温度差は 162.2°C(研磨前の 1.64 倍)の向上が見られ、鋸型よりも大きい温度差が掛かることが確認できた。研磨によるモジュール端面の平滑化はモジュールに掛かる温度差の向上に効果的であることが明らかになった。

今後は、低熱伝導率の基板の使用、モジュール端面の空気層への伝熱セメントなど熱伝導性材料の充填といった、モジュールに掛かる温度差についてさらなる向上に向けた取り組みを行っていく。

5. まとめ

基板を貼り合せた形のモジュールについて、端面形状とモジュールに掛かる温度差を調査した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 熱源からモジュールへの熱移動は、主に基板の部分を通じて行われる。
- 2) モジュール端面と、高温側熱源および低温側冷却部との接触面積について、冷却部との接触面積を小さくすると、温度差は小さくなる。。
- 3) フラット型モジュールは、接触面に 0.104mm²の空間が発生するため、接触面が見かけよりも減少し、温度差が小さくなる。
- 4) モジュール端面を研磨し、端面粗さを Ra=74μm から 22μm まで平滑化することにより、モジュールに掛かる温度差が増加する。

参考文献

- 1) 「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書 2015) HTML 版: 経済産業省 資源エネルギー庁 (<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/>)
- 2) 「COP21 の成果と今後」: 環境省(2016)
- 3) 増住大地, 野村大志郎, 志賀真, 永吉英昭: フジコー技報 22 (2014) 39
- 4) 福岡俊道, 野村昌孝, 山田章博: 日本機械学会論文集 (A 編) 76 巻 763 号, (2010-3) p.88
- 5) 中本元: 「熱を効率良く移動させるためには?」: 環境・エネルギー産学連携フォーラム in 横須賀 2012 (2012.12.3)
- 6) 一般社団法人住宅性能評価・表示協会: 「二次元伝熱計算における空気層取扱い要領」(2014.9.19)
- 7) 醒井政博: 「電子写真プリンタの定着温度場に関する研究」(1999) 博士論文 九州大学