Bi_2Te_3 系モジュールを用いた 車載用排気熱発電装置[†]

生駒 圭子 宗清正 幸 古谷 健司
小林 正和 小松 宏 篠原 和彦

日産自動車株式会社総合研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 63, No. 11 (1999), pp. 1475-1478
Special Issue on Thermoelectric Energy Conversion Materials

Thermoelectric Generator for Gasoline Engine Vehicles Using Bi_2Te_3 Modules

Keiko Ikoma, Masayuki Munekiyo, Kenji Furuya,
Masakazu Kobayashi, Hiroshi Komatsu and Kazuhiko Shinohara

Nissan Research Center, Nissan Motor Co., LTD., Yokosuka 237-8523

A thermoelectric generator has been made consisting of an inner shell as a exhaust pipe, an outer shell as a water jacket and 16 Bi_2Te_3 modules working at low temperature established between the inner shell and the outer shell. Heat-exchanging fins were formed inside the inner shell with heat transfer area ratios of 0.92, 1.21, 1.65, and 1.99 along the exhaust gas flow, in order to reduce the temperature distribution at the hot side of the modules without over overheating of the module. When the exhaust gas was introduced to the inner shell of the generator under conditions corresponding to a 2-3 litre gasoline engine vehicle running at 60 km/h up a 3-5% hill, the electric power generated by the generator was 193 W. The heat change conversion efficiency of the generator was estimated at to be 37% of the primary exhaust gas energy flux. The generated power was 2.9% of the heat flux through the generator.

(Received April 20, 1999; In Final Form June 29, 1999)

Keywords: thermoelectric generator, Bi_2Te_3 module, fin, thermal resistance, generated electric power, conversion efficiency

I. は じ め に

自動車では、ガソリンの持つエネルギーがエンジンにより機械エネルギーに変換される。その効率は高く30%程度であり、残りのエネルギーは熱としてラジエーターから30%程度、エンジン本体から10%程度、排気から30%程度が外部に放出されている。熱電素子を用いて、現在は捨てられている熱エネルギーを電気エネルギーに変換すると、得られた電力は車両内で消費する電気系統に賄うことが可能になる。その結果、オルタネーターの駆動負荷が低減でき、燃費を削減できる⁽¹⁾。自動車に熱電発電技術を適用して、燃費改善に役立てようとする試みが、幾つかの研究グループによってなされている⁽²⁾⁽³⁾。

我々はこれまでに、Si-Ge 系素子を用いたモジュールを装着した排気熱発電スタックを試作し、約600°Cの排気を導入した場合の発電テスト結果を報告してきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。耐熱性が高

いSi-Ge 系素子を用いることにより、最上流部分に設置したモジュールにおいても、破壊することなく発電することができた。排気からスタックが熱交換してモジュールを通過する熱量を増加させると、排気流の下流方向に沿って、排気温度とともに排気管表面温度が低下することになる。これに伴い排気流下流方向に沿ってモジュールの発電出力も低下するため、発電スタックの総発電出力を単純に増加させることは困難である。

熱電素子として Bi_2Te_3 系材料は、性能指数が高い材料として期待されるものの、これを用いたモジュールとしての耐熱性は250°C程度と低いため、高温排気熱からの変換に使用するには問題がある。そこで、約600°Cの排気を導入した場合に、排気流上流部分に設置されたモジュールの高温端温度を過昇温させないとともに、排気流方向におけるモジュール高温端の温度分布を減少させるため、排気熱発電スタックの排気管内側に設置した集熱フィンの伝熱面積を調整したスタックを試作した。車載用スタックの冷却方式としては、ラジエーターなどを用いた水冷方式と、走行風などによる空冷方式が考えられるが、本試作では水冷方式とした。

[†] 1998年12月1日、熱電交換シンポジウム'98において発表

II. 排気熱発電スタック

発電スタックに組み込むモジュールは、HZ-20(Hi-Z 社, 75 mm×75 mm× t 5.08 mm)を16個使用した。発電スタックの概略図を Fig. 1 に示す。発電スタックは、SUS 製インナーシェル(排気管)と、その外側に設置された Al 製アウターシェル(水冷ジャケット)と、インナーシェルとアウターシェルの間に設置されたモジュールから構成される。インナーシェルの外形寸法は排気流方向に対する垂直断面 160 mm×40 mm, 排気流方向の長さ 450 mm で、内側に SUS 製集熱フィンが一体成形されている。集熱フィンは、インナーシェル長さ方向(排気流方向)に4段に分割し、上流1段目から下流4段目に向かって、伝熱面積比が、0.92, 1.21, 1.65, 1.99となるように、排気流と平行に集熱フィンを設置した。4段目位置における排気流方向と垂直方向の断面図を Fig. 2 に示す。インナーシェルの外側表面の上下2面に、モジュール各8個(2列×4段)をそれぞれアルミナ板(t 0.2 mm)を介して設置した。モジュールの低温端にはアウターシェルの内側表面が接触するように、アルミナ板(t 0.2 mm)を介して設置した。インナーシェル外側に設置したアウターシェル部分の外形寸法は、断面 210 mm×90 mm, 長さ 404 mm である。

III. 発電出力の評価系

発電出力の評価ベンチの概略図を Fig. 3 に示す。燃焼器の燃焼排気を発電スタックのインナーシェルに導入することにより発電を行う。排気温度は燃料と空気の流量比により制御し、発電スタックに導入される排気流量はオリフィス1と2の孔径比によって制御する。発電スタック入口部および出口部の排気温度は、インナーシェルフランジ端よりそれぞれ 60 mm 上流あるいは下流の位置の排気温度を熱電対により測定した。

温度583°C, 流量 30 g/s の排気を発電スタックに導入して発電特性を評価した。この排気条件は2~3 リッタークラスのガソリンエンジン車における 60 km/h, 3~5%登坂走行モードに相当する。一方、冷却水は温度26°C, 流量 0.0015 m³/min の条件でアウターシェルに流入した。インナーシェルおよびアウターシェルの表面温度は、各熱電変換モジュール端面の中央位置と接触する表面にそれぞれ溝加工を施し、熱電対を埋め込んで測定した。Kobayashi らの方法⁽⁴⁾に従ってモジュール単品の内部抵抗を測定した結果、約 0.2 Ω であった。それゆえ発電出力は、1 段目と 2 段目の熱電変換モジュールについては、モジュール 1 個に付き 0.2 Ω の外部抵抗を接続して発電電流および発電電圧をそれぞれ測定した。3 段目と 4 段目のモジュールは、電気的に 2 個直列に接続し、0.4 Ω の外部抵抗を接続して測定した。

Fig. 1 Schematic structure of the thermoelectric generator.

Fig. 2 A vertical sectional view at the step No. 4 of the generator.

Fig. 3 Combustor bench for evaluation of thermoelectric generator.

IV. 結果と考察

1. スタック内温度分布と発電特性

排気を発電スタックに導入した場合の排気温度、冷却水温度および排気流方向に対する発電スタック内の温度分布を Fig. 4 に示す。発電スタック入口の排気温度は583°C, 出口では377°Cであった。インナーシェルの表面温度は最上流の1段目において255°C, 最下流の4段目で220°Cとなった。スタック入口と出口の排気温度の差が206°Cと大きいのに比較し、インナーシェルの表面温度は、250°C近傍で排気流方向の分布を小さく抑制することができた。

発電出力および変換効率を Table 1 にまとめて示す。スタックに導入した排気熱量は 18 kW, 発電スタック入口部

Fig. 4 Temperature distribution in the generator; exhaust gas condition: the condition corresponding to 60 km/h 3~5% hill climb mode of 2~3 liter gasoline engine vehicle, T_{is} : surface temperature of inner shell, T_{os} : surface temperature of outer shell, T_{mh} : temperature of hot side surface of module calculated from the generated power and the data of Hi-Z catalog, T_{gas-in} , $T_{gas-out}$: gas temperature at the entrance and the exit of the inner shell, $T_{water-in}$, $T_{water-out}$: water temperature at the entrance and the exit of the outer shell.

Table 1 Generation power and conversion efficiency of the generator.

Exhaust gas					
$T_{\text{gas-in}}$	583°C				
$T_{\text{gas-out}}$	377°C				
ΔT_{gas}	206°C				
Flow rate	30 g/s				
$Q_{\text{gas-in}}$	18 kW				
ΔQ_{gas}	6.7 kW				
Generator	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	Total
T_{is}	255°C	252°C	223°C	220°C	
ΔT_{shell}	200°C	201°C	172°C	174°C	
Generation power	43 W	40 W	110 W		193 W
T_{mh}	193°C	185°C	201°C		
Efficiency					
Stack efficiency	37 %				
Module efficiency	2.9%				
Total efficiency	1.1%				
Power performance					
Power/Volume of stuck	25 kW/m ³				
Power/Area of modules' surface	3.0 kW/m ²				

と出口部の排気熱量の差は 6.7 kW である。発電出力は、スタック内の 1~4 段目までの 16 モジュールの合計として 193 W を得ることができた。発電スタックに導入した排気熱量 18 kW に対し、発電スタックは排気から 6.7 kW の熱量を獲得することができたので、スタック効率は 37% となる。さらに発電スタックが獲得した熱量 6.7 kW に対し、発電電力 193 W を得ることができたので、モジュール効率は 2.9% となる。発電スタックに導入した排気熱量 18 kW に対する総発電効率は 1.1% となった。また、発電スタックの体積当

たりの出力密度は 25 kW/m³、インナーシェルのモジュール設置面積に対する出力密度は 3.0 kW/m² と算出された。

2. 熱抵抗の見積もり

排気流方向に沿ってシェル表面の温度差と発電出力を比較する。シェル表面の温度差は 1, 2 段目が約 200°C、3, 4 段目は約 170°C と減少しているのに対し、発電出力では 1, 2 段目において 43, 40 W、3, 4 段目では平均 55 W と増加している。この結果は、特に高温側のインナーシェル表面温度と、実際のモジュール高温端面の温度が一致していないことを示唆している。Hi-Z 社カタログ⁽⁶⁾に示された温度差に対する出力曲線を用い、低温端は実際のモジュール低温端温度とシェル表面温度が一致していると仮定して算出したモジュール高温端温度を Table 1 に示す。Hi-Z 社カタログ図から読み取った温度差 100, 150, 200, 250°C に対する最大発電出力値は、5.8, 9.9, 19.7, 27.2 W とした。1, 2 段目では、算出されたモジュール高温端温度は測定されたシェル表面温度より、約 65°C 低いことになる。想定される原因として以下の 2 点が挙げられる。①上流部分では集熱フィンの設置密度が低いために、モジュール設置時のアウターシェルの締め付けによってインナーシェルに歪みが生じた結果、インナーシェル表面とモジュール端面が密着していない。②上流部分は排気温度が高温であるため、集熱フィンの部分的な加熱などにより、インナーシェルに歪みが生じた。

シェル表面とモジュール端面との間には、絶縁性アルミナ板を挿入して設置した構成であるため、この間の熱抵抗はアルミナ板自体の熱抵抗の他、シェル表面-アルミナ板表面の接触熱抵抗とアルミナ板表面-モジュール端面の接触熱抵抗の和になると考えられる。インナーシェル内の排気温度とアウターシェル内の冷却水温度が排気流方向に直線的に低下すると仮定し、各モジュール設置段における排気から冷却水までの熱抵抗を式(1)に基づいて概算した。各段部分において、インナーシェルからアウターシェルへ流入する熱量 Q_x は、Fig. 4 に示す各段の直前位置と直後位置での排気温度の差から算出した。熱は全てモジュールを通過してインナーシェルからアウターシェルへ伝達されると仮定した。 R_g は排気からモジュール高温端側のアルミナ板が接触するインナーシェル外側表面までの熱抵抗、 R_i はインナーシェル表面からモジュール高温端面までの熱抵抗、 R_o はモジュール低温端面からアウターシェル表面までの熱抵抗を示す。 R_m はモジュール自体の熱抵抗で、Hi-Z 社カタログ記載の熱伝導度 2.4 Wm⁻¹K⁻¹ から算出した。 R_w はアウターシェル表面から冷却水までの熱抵抗を示す。

$$Q_x = (T_{gas} - T_{is})/R_g = (T_{is} - T_{os})/(R_g + R_i + R_o) = (T_{os} - T_w)/R_w \quad (1)$$

各段ごとに算出した結果を Fig. 5 に示す。各段における排気から冷却水までの全熱抵抗の内、排気からインナーシェル表面までの熱抵抗 R_g は 54% 程度を占めた。1 段目と 4 段目のフィンの伝熱面積比が 0.92 と 1.99 であったのに対し、 R_g

Fig. 5 Thermal resistance of step aligned with gas flow.

は0.27と0.21で大きな差がない。また、インナーシェルおよびアウターシェルの表面からモジュール両端面までの接触熱抵抗 R_i+R_o は、排気流上流の1, 2段目では下流の3, 4段目の約1.4倍となり、モジュールの熱抵抗 R_m と同程度と見積もられる。1, 2段目の接触部分の熱抵抗 R_i+R_o は、単位面積当たり約 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ となる。これは、堀ら⁽⁷⁾の熱発電装置での測定値 $(10 \sim 16) \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ よりやや小さい値であり、我々の発電スタックの方がモジュールの設置面積が小さいため、シェルの歪みが少ないことに起因すると考えられる。

ここまで排気温度がインナーシェル内で直線的に低下すると仮定したが、これは各段部分において排気からモジュールを通過して冷却水へ流入する熱量が一定であることを示す。しかし、実際には1, 2段目と3, 4段目のモジュール両端の温度差には差があり、この温度領域でモジュール自体の熱抵抗が一定値とすれば、モジュールを通過した熱量が一定でないことになる。つまり、インナーシェル内での排気温度は直線的には低下していないことを示唆する。発電スタック構成を最適化していくためには、排気温度分布を見積もり、 R_g 値を設計することが重要で、さらに詳細な排気温度分布やスタック内の温度分布を測定などの検討が必要である。

また、接触部分の熱抵抗がモジュール自体の熱抵抗と同程度であることは、発電効率や出力密度を向上させる上で重要な問題である。例えば、接触部分の熱抵抗 $R_i+R_o=0$ で、シェル表面の温度差とモジュール両端の温度差とが一致する

と想定すると、Hi-Z社のカタログ特性から1.4倍の約270 Wが得られることになる。接触熱抵抗を低減するために、一般的に使用される熱伝導性シート材や熱伝導グリースは、200°C以上となるモジュール高温端側に使用することは困難である。今後、特性が Bi_2Te_3 モジュール同等以上で耐熱性が向上したモジュールが開発された場合は、接触熱抵抗の低減がさらに重要な課題となる。そのためにはモジュールの構成やサイズなどを含めたスタック全体の構成を検討する必要があると考えられる。

V. ま と め

- (1) Bi_2Te_3 系素子を用いたモジュールを装着した発電スタックを試作し、583°C, 18 kWの排気から193 W発電させることができた。
- (2) 排気流の下流になるに従ってインナーシェル内側の集熱フィンの伝熱面積を増加させることにより、排気流方向におけるインナーシェルの表面温度のバラツキを抑制することができた。
- (3) シェル表面とモジュール端面との接触部分の熱抵抗が大きく、排気流上流部分では、モジュールの熱抵抗と同程度と見積もられた。接触部の熱抵抗の低減が、発電効率や出力密度を向上させるには大きな課題となることが考えられる。

文 献

- (1) 篠原和彦, 小林正和, 櫛引圭子, 古谷健司: 自動車技術, **52**(1998), 78-82.
- (2) E. Takanose and H. Tamakoshi: Proceedings of The 12th International Conference on Thermoelectrics, (1993), 467-470.
- (3) J. C. Bass, N. B. Elsner and F. A. Leavitt: Proceedings of The 13th International Conference on Thermoelectrics, American Institute of Physics, New York, (1994), 295-298.
- (4) M. Kobayashi, K. Ikoma, K. Furuya, K. Shinohara, H. Takao, M. Miyoshi, Y. Imanishi and T. Watanabe: Proc. of 15th Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE, Service Center, Piscataway, (1996), 373-378.
- (5) K. Ikoma, M. Munekiyo, K. Furuya, M. Kobayashi, T. Izumi and K. Shinohara: Proc. of 17th Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE, Service Center, Piscataway, (1998), 464-467.
- (6) <http://www.hi-z.com/website07.html>.
- (7) 堀 康彦, 伊藤哲夫, 泉 邦和: 電力中央研究所報告, 研究報告 W95022, (1995).