熱電素子による自動車排気熱 発電技術

篠原 和彦*

1. はじめに

地球環境の保全が世界的規模で大きな関心事となってきた。これに伴い、エネルギー変換技術の向上、エネルギー源の輸送や貯蔵の効率化、エネルギーの未利用分の有効利用等が主要な技術課題と考えられ、これらに関連する研究開発が精力的に進められている⁽¹⁾。この未利用エネルギーのうち熱エネルギーが大きな領域を占めており、地熱や海洋温度差、工場廃熱、廃棄物処理廃熱、自動車排気熱等が研究されている。これらは総じてエネルギー密度が小さく分散型であるが、量は膨大である⁽²⁾。自動車は、これらの中でも特に一施設あたりの規模が小さい廃熱源であるが、使用エネルギーの7割以上を熱エネルギーとして捨てている。自動車の絶対量は極めて多く、この廃熱を有効利用することは、国家的規模で大量の化石エネルギーの削減につながる⁽³⁾。このような規模が小さく、かつ設置領域がきつられる環境下での熱エネルギー変換の方法として熱電素子を用いた発電技術が有望と考えられる。自動車においては、熱電素子を用いて排熱を電力に変換することにより、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⁽⁴⁾。ここでは、熱電素子を自動車へ適用した場合の効果やそのための技術課題の現状と今後の課題について述べる。

2. 自動車におけるエネルギーフロー

図1に自動車におけるエネルギーフローの概略を示す。ガソリンはエンジンにより機械エネルギーに変換される。このときの効率は高くても30%程度である。残りのエネルギーは熱としてラジエーターおよびエンジン本体から40%程度、

図1 自動車における燃料から走行に至るエネルギーの流れ。

さらに排気ガスから30%程度が外部に放出されている。軸トルクとして取りだされたエネルギーは、機械摩擦やオイルポンプ、オルタネータ等の補器駆動用に消費され、最終的に走行に使用されるエネルギー量はガソリンの持つエネルギー量のうちの15%程度と見積もれる。オルタネータは車両内部で使用される電力を供給する発電機であり、車種によっても容量は異なり1kWを越えるものも使用されている。例えば、自動車での消費電力が500W程度と仮定すると、およそ10%程度のガソリンの持つエネルギーがオルタネータ駆動のために消費される。

(1) 熱電素子を用いた排気熱発電の原理

熱電発電を行うことにより、上記のオルタネーターを駆動するためのエネルギー(約10%程度)の削減が期待できる。

排気熱発電を行う場合の熱電素子のエネルギー源は、エンジンからの廃熱である。この廃熱は、図1に示した通り、エンジン本体、ラジエーターおよび排気ガスから大量に捨てら

* 日産自動車株式会社総合研究所シニアリサーチャー(〒237-0061 横須賀市夏島町1)
Thermoelectric Generator for Automobile; Kazuhiko Shinohara (Nissan Research Center Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka)
Keywords: thermoelectricity, generator, alternator, automobile
1999年6月4日受理

図2 ゼーベック効果。

れている。ラジエーターからの廃熱はエネルギー量自体は高いものの、温度域が低い。これに対し排気ガスの持つエネルギー量は、走行状態に依存し変動は大きいものの、高い温度域に入る。通常の走行(10-15モード)では排気ガス温度は触媒コンバータ下流で300℃から500℃以上の領域であり、その排気熱量は約2 kW から10 kW 程度である。よって、この熱源から500 W 程度の電力への変換が熱電素子に要求される。

(2) 熱電素子による熱電発電技術

熱電素子とは、金属あるいは半導体両端に温度差を付けた場合、その高温部と低温部との間に電位差が発生するというゼーベック効果を利用した素子である(図2)⁽⁵⁾。この原理は熱電対に代表されるように既に多く利用されている現象であるが、発電という観点では、これまでに自動車には実用化されていない技術である。研究レベルとしては、ディーゼルエンジンに排気熱発電装置を取付出力を測定した例や⁽⁶⁾、ガソリンエンジン乗用車の排気系に排気熱発電装置を取り付け、発電テストを実施した結果が報告されている。この発電システムの大きな特徴は、機械的な駆動部分を持たず、熱を直接電気に変換する事が可能なため、極めて小型軽量の発電システムを構成できる点である。自動車以外では、既に僻地用の電源施設や、惑星探査船(Voyager II)等宇宙環境で使用されている実績がある。地熱発電や海洋温度差発電への適用をはじめ⁽⁷⁾、近年はごみ焼却炉の廃熱を熱源として本技術を利用する取り組みも進められている。

3. 自動車用熱電発電装置の構成

自動車において排気熱発電を行うためのシステム構成を図3に示す。排気ガスは排気管、触媒を経て排気熱発電装置(スタック)に入る。ここで排気ガスの熱エネルギーは電気エネルギーに変換される。この電気エネルギーは、電圧の制御系を経てバッテリー、電装品に投入される。

このスタックは、内部にゼーベック素子からなる多数の発

図3 自動車排気熱発電システム。

電モジュール、排気ガスと熱交換する吸熱部、さらにモジュールの低温端を冷却するための放熱部から構成されている。

(1) 熱電材料

熱電発電材料の研究開発はこれまでに長い歴史があり、多くの材料が提案されてきている。代表的な熱電材料のうち、これまでに商品化されてきた実績のあるものとして、Bi-Te 系材料、Pb-Te 系材料、Si-Ge 系材料が挙げられる。図4にこれらの材料の最大発電効率 η を材料の高温端温度に対し示す⁽⁸⁾。最大変換効率 η は式(1)により求めている。

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{M - 1}{M + \frac{T_c}{T_h}} \quad (1)$$

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{T_h + T_c}{2}} \quad (2)$$

ここで、 T_h 、 T_c および Z はそれぞれ高温端温度、低温端温度、性能因子としている。 Z は熱電材料固有の値である。Bi-Te 系材料は現在ペルチェ素子として電子冷却、冷凍用途に適用されており低温で極めて性能が高いものの材料の融点および接合部分の耐熱性が低いため、ガソリン車の排気系の温度条件には合致しない。また、Pb-Te 系材料も同様にペルチェ素子として利用されており、かつ中温度領域で高い性能を示すため、極めて有望ではある。しかしPbは世界的に使用が制限されている。Si-Ge 系材料は、発電効率自体はこれらの材料の中では低いものの高温信頼性、耐久性、安全性ともに満足行くものである。さらにこのSi-Ge 系材料は、惑星探査船等々に使用された実績が有り極めて有望であるが、最大発電効率は、自動車排気ガスの常用の温度域である500℃程度で約5%と低く性能の更なる向上が望まれる。このように従来から用いられている熱電材料は性能面、信頼性の面で自動車用途という観点からは不十分といわざるを得ない状況にある。

図4 代表的熱電材料の変換効率の温度依存性.

一方、近年極めて性能の高い材料が見つかりつつある。代表的な素材としては、skutterudite 構造を持つ材料である。性能的には Si-Ge 系材料の倍以上の変換効率を得られる可能性がある⁽⁹⁾。また、従来の Bi-Te 系材料についても微細組織の制御により性能の大幅向上を実現したことが報告されるなど、材料面でも着実に研究が進んできている。

(2) モジュール化技術

熱電発電材料は、電気的には直列に、また熱的には並列になるような一つのモジュール形態に組み立て使用される。図5に Si-Ge 系材料を用いた発電モジュールの例を示す。

発電モジュールには p 型、n 型それぞれの発電材料が数対から数10対から100対以上組み込まれているのが一般的である。ここでポイントとなるのが熱電材料と電極との接合である。自動車で熱電変換素子を使用する上で、先に示した通り低融点の接合材は使用できない。高温で使用するためには、その使用最高温度を越える融点を持つろう材による接合形成や、拡散圧接、プラズマ溶射等の手法が必要となってくる。現状では、このようにモジュールの作成プロセスにおいても、製造コスト、信頼性、性能面で実用段階にあるとはいえないものの、排気熱発電の実用化には避けては通れない重要な領域であり現在研究が進められている。

図5 熱電発電モジュール(資料提供：日本発条株式会社)。

図6 発電スタック試作品とその断面略図。

(3) スタック技術

スタックとは、自動車の排気ガスから熱エネルギーを取り出し発電モジュールに伝え、さらに発電モジュールの低温側から、熱を冷却水や大気に出すための熱交換器の機能が要求される部品である。つまりスタックの熱交換部では、変動の大きな自動車排気ガスの熱エネルギーの半分以上を、自動車という限られた空間内の極めて狭い領域で取りださなければならない。さらにエンジンの効率低下に直結する排気抵抗の増加は極力避けなければならない。よって、排気ガスとの熱交換促進のためのフィンの設置位置、方法についてもその設計には細心の注意を要する。我々の検討した発電スタックを図6に示す。ここに示したように、発電スタックは排気ガスと熱交換を行う排気管を有し、ここに熱伝達促進のためフィンが設置されている。また、冷却側は水冷とし、この二つ

の部品の間にも前記の多数の発電モジュールを配置している。熱交換、熱伝達に対しても、決して容易な状況にはないが、今後ここに示したようなスタック形状とは大きく異なる新たな発想を含め、十分実用に耐える発電スタックが開発されることを期待したい。

(4) システム技術

上記のような発電スタックから取り出した電力は、エンジンの負荷状況等によりかなり変動する。この電圧と電流ともに変動する電力をバッテリーおよび電装品に供給するため所定の電圧(12~14 V程度)に変圧しなければならない。また、走行状態を考慮したオルタネータとの協調制御を行うことにより、さらなる燃費改善も期待できる。しかし、現在発電スタックが開発されていない状況では、残念ながらこのような領域の研究開発は机上検討にとどまらざるを得ない。

今後は、上記のような発電スタックの開発に平行し、このような発電システムの制御についても検討が進められて行くことを期待したい。

4. ま と め

現在の最先端の熱電変換技術を駆使することにより、材料で変換効率5%以上、スタックの熱交換効率で50%以上は可能な所まで来ていると考えられる。つまり、自動車への適用においては燃費にして5%程度削減することが可能なレベルまで技術的には到達していると考えられる。さらに、今後の電力需要の増加を考えると、この発電能力の一層の増加が期待される。一方、昨今の直噴エンジン等を始めとする内燃機関の熱効率の向上に伴い、排気ガスへの排気熱量の低下や、

排気浄化触媒装置との技術的成立性など多くの解決しなければならない課題がある。モジュールのコストも依然として解決されていない大きな課題として存在する。しかしながら、社会的に環境・エネルギー問題が騒がれている現在、熱電変換技術をベースとした廃熱発電技術は、大きなエネルギー削減の効果が期待でき、将来必ず役立つ重要な技術であることは疑問の余地はなく、今回紹介したような技術課題が解決され、本技術が広く使われていくことを期待したい。

文 献

- (1) 通商産業省：ニューサンシャイン計画ハンドブック，東京，通商産業調査会，(1993)，7.
- (2) 通商産業省資源エネルギー庁：エネルギー政策の歩みと展望，東京，通商産業調査会，(1993)，75.
- (3) M. Kobayashi, M. Kobayashi, K. Ikoma, K. Furuya, K. Shinohara, H. Takao, M. Miyoshi, Y. Imanishi and T. Watanabe: "Thermoelectric Generation and related properties of conventional type module based on Si-Ge Alloy", Proc. 15th Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE, (1996), 373.
- (4) 篠原和彦，小林正和，櫛引圭子，古谷健司，宗清正幸，小松宏：粉体および粉末冶金，46(1999)，524.
- (5) D. M. Rowe: *CRC Handbook of THERMOELECTRICS*, New York, CRC Press, Inc., (1994), 1.
- (6) J. C. Bass *et al.*: Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines, Proc. of 13th Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE, (1994), 295.
- (7) 梶川武信，太田敏隆，西田勲夫，松浦慶士，松原角衛：熱電変換システム技術総覧，リアライズ社，(1997)，107.
- (8) 上村欣一，西田勲夫：熱電半導体とその応用，日刊工業新聞社，(1988)，13.
- (9) J.-P. Fleurial, A. Borshchevsky, T. Caillat, D. T. Morelli and G. Meisner: High Figure of merit in Ce-Filled Skutterudites, Proc. of 15th Int. Conf. on Thermoelectrics, IEEE, (1996), 91.