

熱電発電によるディーゼル機関の排熱回収

福田 昌准*

Diesel Exhaust Heat Recovery by Thermoelectric Power Generation

Masanori FUKUDA

Diesel engines have higher thermal efficiency compared to other heat engines, so that they have been widely used for power sources such as automobiles and ships. Their thermal efficiencies are around 30-40 %, which indicates that the rest of the fuel energy supplied to the engine is consumed as heat losses to the exhaust gas and others. Therefore, in addition to the improvement of thermal efficiency, the recovery of the energy wasted as these losses is also important from the standpoint of effective energy utilization. In this study, thermoelectric power generation tests were attempted at different engine conditions in order to clarify the availability of thermal energy included in the diesel engine exhaust gas. As a result, it was experimentally demonstrated that thermoelectric power generation is a practical method to convert the engine exhaust heat into electric energy. And a couple of concerns to resolve before practical applications are also mentioned.

Key Words : Heat Recovery, Thermoelectric Power Generation, Diesel Engine, Thermal Efficiency

度変化への対応も必要であることを示唆した。

1. はじめに

ディーゼル機関は他の熱機関に比べて熱効率がよく、地球温暖化防止の点においても優れた資質を有しているため、自動車や船舶などの動力源として広く用いられている。しかし、熱効率は30～40%程度であり、残りの燃料エネルギーは損失として排気や冷却水に捨てられている。このため燃焼改善による熱効率の向上とともに、これらエンジン廃熱の活用はエネルギー有効利用の見地からも重要である。

このうち排ガスから放出される排熱の回収方法としては、スターリングエンジン⁽¹⁾、熱交換器、排気タービンなどの利用や熱電素子による熱電発電などが提案されている⁽²⁾。熱電発電は、熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換でき可動部を持たないことから、自動車用への適用を考慮して燃費への効果⁽³⁾や省エネルギーと経済性⁽⁴⁾の検討なども行われているが、実用化には課題も多い。

本研究では、ディーゼル機関の排気管に熱電素子を取り付けてエンジン排気熱による熱電発電の有効性を確認するとともに発電特性および問題点などを調査した。その結果、熱電発電はディーゼル機関の排熱回収として有望な方法であるが、負荷などの変動に伴う温

2. 熱電発電と実験機関

2.1 熱電発電

熱電素子⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、熱と電気を関係付ける素子の総称であり、その原理はペルチェ効果やゼーベック効果に基づいている。ペルチェ効果は2種類の異種金属に電流を流すと一端に発熱、多端に吸熱を起こす現象を言い、ワインクーラーや小型冷蔵庫などに実用化されている。一方、ゼーベック効果は2種類の異種金属または半導体の両端を接続し、その両端に温度差を設けると起電力が発生する現象である。ゼーベック素子を用いて熱エネルギーを電気エネルギーに変換する発電方法を熱電発電と言い、工場などの廃熱や最近では自動車の排熱回収への適用も進められている⁽⁷⁾。このため高温で使用可能な熱電素子が開発されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本研究で用いた熱電素子ユニット（高木製作所、SU-05B）の仕様を表1に示す。発電素子はBi-Te系で加熱部と冷却部の温度差が200℃のもとで最高出力5Wを発生する。外形寸法は60×60×21mmで加熱面およ

Table 1 Specifications of thermoelectric element

型式	高木製作所 SU-05B
発電能力	5 W (温度差 200 °C)
外形寸法	60 × 60 × 21 mm

原稿受付 平成23年8月30日

*機械工学科

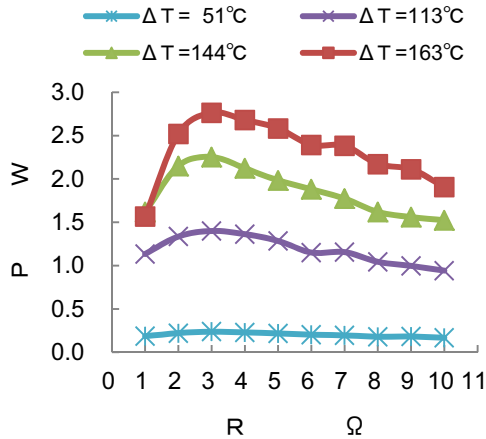


Fig.1 Characteristics of thermoelectric power generation

び冷却面は銅製であり、冷却部には冷却水の流路が設けてある。このユニットをディーゼル機関の排気管に取り付け、排ガスを高熱源とする熱電発電を試みた。

ディーゼル機関の排気管に取り付ける前に、専用の加熱ユニット（高木製作所、HU-200C）を用いて調査した熱電素子の熱電発電特性を図1に示す。高温部の温度は、加熱ユニットに加える電圧を調整して変化させ、K型熱電対（シース外径3.2mm）とデジタル温度計（YOKOGAWA, 2572）を用いて読み取った。熱電素子の出力電力は、素子へ負荷する抵抗値を変化させ回路の電流と電圧から求めた。このとき低温側は流量3L/min一定の水道水で冷却しており、図は高温部と低温部の温度差 ΔT で整理してある。回路の抵抗 R が大きくなると素子を流れる電流が低下し電圧は増加する。その結果、電力 P は実験の範囲ではいずれの温度差でも負荷抵抗 $R=3\Omega$ で最大となっている。また温度差が大きいほど出力は高くなり、温度差 $\Delta T=163^\circ\text{C}$ で最高2.8Wの電力を発生している。このときの電流、電圧は、約1A、2.8Vである。

2.2 実験機関

実験には水冷単気筒の四サイクル間接噴射式ディーゼル機関IDI（三菱NM5H）を用いた。その主要諸元は表2に示すとおりである。図2は実験機関の正味熱効率 η を正味平均有効圧力 p_e に対して整理した結果である。直接噴射式機関DI（クボタE1250-NB、 $\phi 92 \times 90$ 、行程体積0.598L）の結果も併せて示してある。IDI機関の熱効率はDI機関に比べると低い、全負荷に相当する $p_e=0.57\text{MPa}$ では約29%に達している。残りの燃料エネルギーは、排気損失、冷却損失、摩擦損失などに消費されている。本研究で回収を目指している排気損失は、負荷の上昇によって排気温度が増加するため増大し、全負荷では燃料エネルギーの約25%に達する⁽¹⁰⁾。これは正味熱効率に相当するエネルギー損失である。

Table 2 Engine specifications

エンジン型式	三菱 NM5H
燃焼室形式	予燃焼室式
内径×行程	$\phi 68 \times 80\text{ mm}$
行程体積	0.290 L
圧縮比	23.0
連続定格出力/回転数	3.0 kW / 2200 rpm

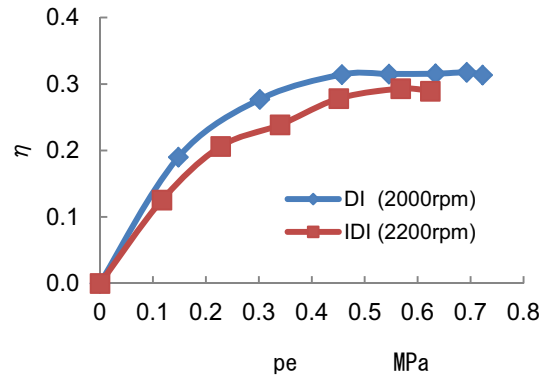


Fig.2 Thermal efficiency of diesel engines

表1に示す熱電素子ユニットを排気管に取り付けるため、排気管の一部を内径28mmの鋼管から、60mm×60mmの平面を持つ長方形断面に変更した。そして熱電素子取り付け面は、空気層の発生に伴う熱伝導の低下を抑えるため研磨を施した。排気管表面温度 T_s を排気出口から約350mmの位置となる排気管と熱電素子の密着面の中央にシース外径1mmのK型熱電対を取り付けて測定した。また排気温度 T_e は、排気出口から T_s と同じ距離の排気管中央で測定した。実験は表2に示す機関を回転数 $n=2200\text{rpm}$ 一定で運転し、エンジン負荷や冷却水温度の熱電発電特性への影響について調査した。

3. 実験結果および考察

3.1 エンジン負荷の影響

熱電素子に加わる負荷抵抗 R に対する電力 P の変化を5段階のエンジン負荷で比較した結果が図3である。正味平均有効圧力 $p_e=0.57\text{MPa}$ が、機関の連続定格出力に相当する負荷である。電力は負荷の上昇に伴って増大し、いずれの負荷でも $R=3\Omega$ で最大となっている。最高出力は $p_e=0.62\text{MPa}$ で得られ、その値は2.6Wである。

このときの排気温度 T_e と排気管表面温度 T_s の変化を正味平均有効圧力 p_e に対して図4に示す。HR付が熱電素子を用いて排熱回収を行った場合の結果を表す。排熱回収を行わない場合には、排気管に熱電素子ユニットと同寸法の鋼板を取り付けて温度測定を行った。

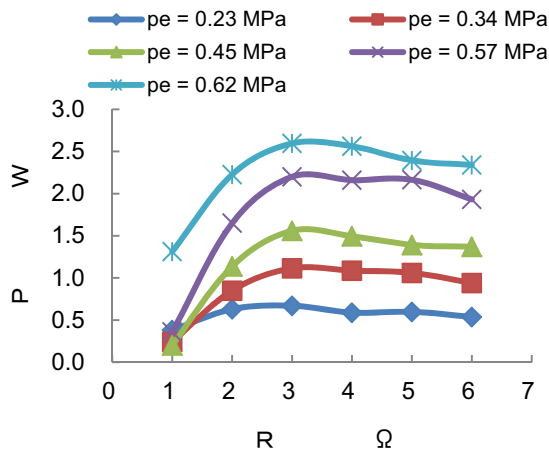


Fig.3 Effect of engine load on thermoelectric power

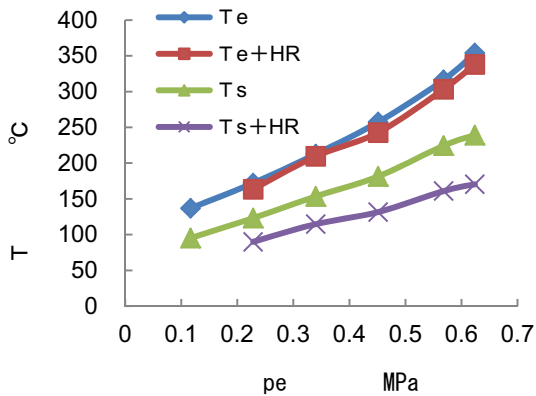


Fig.4 Exhaust gas and exhaust pipe surface temperature

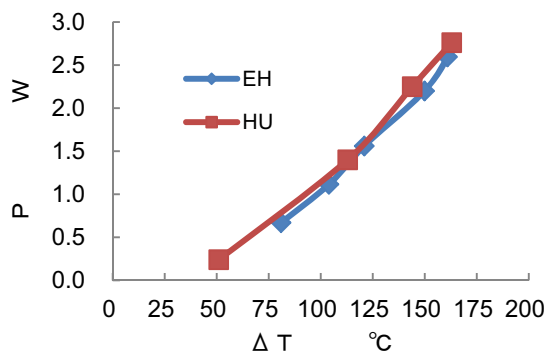


Fig.5 Relationship between temperature difference and thermoelectric power

エンジン負荷が増加すると排気温度が上昇し、これに伴って表面温度も増大するために図3のように高負荷ほど出力電力は高くなる。排熱回収 HR の場合には、熱電素子の低温側を流量 3 L/min 一定の水道水（温度 9 °C）で冷却しており、これにより表面温度が排熱回収を行わない場合に比べて高負荷では 50 °C 以上も低下している。また排気温度と表面温度には高負荷では大きな温度差が認められ、排熱の有効利用の観点からは

排気管の形状や断熱等に工夫が必要となる。これが熱電素子の出力増大に繋がるが、熱電素子には耐熱温度があるため限界も生じる。なお本実験では排気管表面の断熱は行っていない。

図3における各負荷での最高出力を熱電素子の高温部と低温部の温度差 ΔT に対して整理した結果を図5に示す。高熱源にエンジン排熱 EH を用いた場合の結果に加えて図1の加熱ユニット HU を用いた結果も併記してある。2つの結果は同じ特性を示し、熱電素子から得られる電力は熱源の種類に関わらず温度差のみに依存することが確認できる。そしてエンジン負荷によって排気温度が変化するため、出力電力は変動する。例えば、エンジン負荷が $pe=0.62\text{MPa}$ から 0.23MPa に低下すると、温度差は 1/2 になり電力は 1/4 に低下する。このように温度差の低下は大きな出力低下となり、実用化の際にはエンジン負荷や回転数の変化に対する出力電力の変動や応答も問題となる。

また、この結果から温度差を 200 °C にまで増大させると約 4 W の電力が得られると推定できる。これは表1に示す熱電素子の最大電力の約 80% であり、熱電素子ユニットと排気管との接触面における熱損失が出力低下の原因と推察される。また熱電発電の出力は、高熱源と低熱源の温度差のみに依存することから、熱電発電はディーゼル機関に限らずガソリン機関やその他の廃熱の回収に有効な手法であることも示唆される。

3.2 冷却水温度の影響

以上の結果は、熱電素子の低温側は水道水を用いて冷却しているが、ディーゼル機関を用いた閉じたシステムにするには、冷却をエンジンに求めなければならない。そこで、エンジン冷却水を低温側に用いて実験を行った。図6は、 $pe=0.57\text{MPa}$ のもとでエンジン冷却水温度 T_w を通常の 80 °C から 50 °C まで低下させて熱電素子の出力電力 P を測定した結果である。 $T_w=10\text{°C}$ は、図3に示す冷却に水道水を用いた場合の結果である。エンジンの冷却水温度はウオータージャケットで測定し、

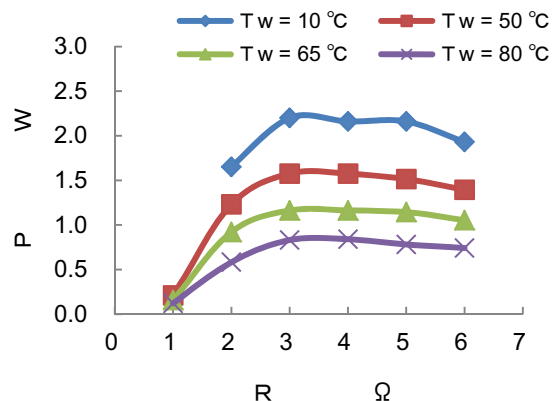


Fig.6 Effect of cooling temperature on output power

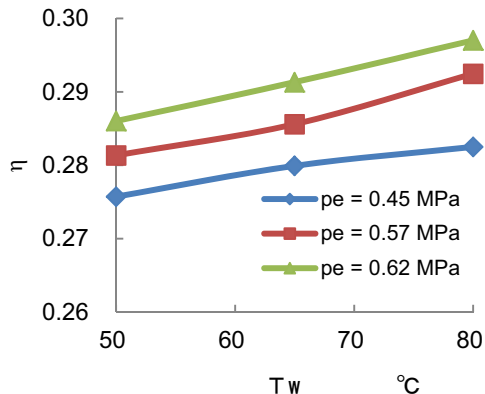


Fig.7 Effect of cooling water temperature on thermal efficiency

冷却水の循環流量を変えて調整した。熱電素子の低温側での温度低下により、高温側である排気管表面温度もごくわずかに温度低下が認められるが、実験の範囲では 10°C 以下である。冷却水温度が低下すると高熱源との温度差が大きくなるため出力は増大している。しかし出力電力は、冷却に水道水を用いた場合に比べて低い。

ところで、エンジン冷却水温度が低下すると燃焼室からの冷却損失が増大して、熱効率が低下する。その影響をエンジン冷却水温度 T_w に対して3種類の負荷で比較した結果が図7である。冷却水温度が 80°C から 50°C に低下すると、熱効率 η は $0.7\sim 1.1\%$ 減少している。このときの熱電発電の出力増加は、 $0.45\sim 0.82\text{W}$ である。熱効率 1% は、 $n=2200\text{rpm}$, $p_e=0.57\text{MPa}$ の運転条件の下では 102W の燃料エネルギーに相当し、これに比べると冷却温度低下に伴う熱電発電の出力増大は、はるかに小さい。

実際機関の冷却水温度は 80°C 以上に達しており、エンジン冷却水を低温部に用いるには熱交換器等で冷却する必要が生じる。冷却水温度を $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ まで低減できたとしても、ディーゼル排熱を高熱源とする閉じたシステムとした場合の出力電力は図3の結果よりも低下する。その割合は、冷却水温度 40°C として図5を用いて推測すると全負荷では 35% に達する。出力増大には、温度差の確保が重要であることが再認識できる。

ところで、本研究の結果から判断すると、エンジン

を全負荷で運転するとして、熱効率を 5% 改善するには約230個の熱電素子が必要となる。つまり、十分な電力を得るには、温度差を確保するために効率の良い加熱および冷却システムを構築するとともに複数個の熱電素子を積層する必要がある。

4. おわりに

ディーゼル機関の排気管に熱電素子を取り付けて、排熱を電力とし回収することを試みた。その結果、ディーゼル機関の排熱で熱電発電が可能であることを実証できた。十分な電力の確保には複数個の熱電素子の積層が必要であり、エンジン負荷や回転数などの熱負荷の変化に伴う熱電発電電力の変動への対応も重要となる。また発電力は高熱源と低熱源の温度差のみに依存することから、熱電発電はディーゼル機関に限らず温度差がある廃熱の回収に有効な方法であることも確認できた。

最後に、卒業研究として実験に意欲的に取り組んだ平成22年度本校機械工学科卒業生、池晃平氏および磯山浩史氏に深く感謝する。

参考文献

- (1) 矢口寛ほか、排気熱回収スターリングエンジンの研究、自動車技術会学術講演会前刷集、45-10 (2010.5)、5-10。
- (2) 排熱利用のテクノロジー、モーターファン・イラストレーテッド、28 (2009.2)、32-59。
- (3) 森正芳ほか、熱電素子を利用した自動車の排熱回生技術の燃費効果シミュレーション、自動車技術会学術講演会前刷集、45-10 (2010.5)、11-14。
- (4) 工藤博之・縫部綴、高速バス用熱電変換システムの開発、電気学会全国大会講演論文集、4-187 (2004.3)、300-301。
- (5) 熱電素子の基礎知識、
<http://motorshow777.jp/tokyo/netsudensoshi/>
- (6) 熱電素子、日本冷凍空調学会 web サイト、
<http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/72.html>
- (7) 向島美香ほか、熱電発電による自動車の排熱回収、自動車技術、64-4 (2010.4)、79-84。
- (8) (株) KELK web サイト、<http://www.kelk.co.jp/news/090128.html>
- (9) 昭和電工 (株) web サイト、
http://www.sdk.co.jp/news/2010/aanw_10_1207.html
- (10) 草薙友陽・久松建也・福田昌准、ディーゼル排気を用いる熱交換器の性能、計測制御学会中国支部津山地区計測制御研究会講演論文集 (2010.2)、35-36。