

熱電素子を利用した車両用廃熱回生技術と燃費改善

Heat Recovery Technology of Automobile Using Thermoelectric Element and Its Effect on Fuel Economy

森 正 芳*
Masayoshi MORI
服 部 真*
Makoto HATTORI

山 上 武* 織 田 信 之*
Takeshi YAMAGAMI Nobuyuki ODA
原 口 友 秀* 空 澤 光 将*
Tomohide HARAGUCHI Mitsumasa SORAZAWA

要 旨

自動車の排気熱エネルギーを対象とする熱電素子を利用した廃熱回生システムの開発に先立ち、現状の技術レベルの把握、課題、鍵となる技術を抽出するためのシミュレーション手法を開発した。

車両の燃費は、発電電力による正の効果だけでなく、それに伴う重量、背圧の増加によって、負の影響も受ける。熱電技術を生かした燃費効果は、これら因子が最適にバランスされた上に存在し、これらを最適化するための指針の構築もおこなった。

結果、既存の熱電素子を使った廃熱回生では、ほとんど燃費を向上させることができないことが明らかになった。燃費を改善するためには、100℃から350℃の間で性能を発揮する素子が必要であることが明らかとなり、新しい素子の開発が鍵となることがわかった。また、使い方としては、シリーズハイブリッドのように、エンジンを定速運転するほうが、一般的な車より2倍程度燃費効果が高いことも明らかとなり、素子の開発、最適な車の選定、排気系の断熱対策を含めると、3%以上の燃費改善を達成する可能性のある技術であるとの見解を得た。

ABSTRACT

Prior to the development of a heat recovery system using thermoelectric elements for automobile exhaust heat energy, simulation methods were developed to understand the current technical level and extract issues as well as key technologies.

Generated power not only has a positive effect on automobile fuel economy, but there are also the negative effects of increased weight and backpressure. Effects of fuel economy making full use of thermoelectric technology lie in optimum balance of these factors. Thus, guidelines for optimizing this balance were also developed.

The results showed that heat recovery using existing thermoelectric elements is nearly unable to enhance fuel economy. Elements that exhibit good performance within the temperature range of 100°C to 350°C should be employed, and development of new elements is found to be the key. Furthermore, investigations also showed that a heat recovery system provides approximately twice the fuel economy effects when the engine is operated at constant speed such as in a series hybrid, compared to an ordinary car. These findings provided the outlook that the combination of developing new elements, selecting the optimal car type, insulating the exhaust system, and adopting other technologies leads to enhance fuel economy by 3% or more compared to conventional levels.

1. はじめに

自動車の燃費技術は近年特に重要となっており、さまざまな廃熱回生技術の開発がおこなわれてきている。中でも動的な要素がなく、シンプルで直接有用性の高い電気エネルギーに変換可能な熱電技術が自動車の廃熱回生手段として注目されている⁽¹⁾。

しかしながら、自動車の廃熱回生においては、発電出力に着目する検討事例^{(2), (3)}や、発電出力のみに着目して燃費に換算した検討事例⁽⁴⁾はあるものの、デバイスによる負の

効果を適正に取り込んだ、現実的な自動車の燃費に着目したものに乏しい。熱電技術を自動車の燃費向上策として価値あるものにしていくために、具体的に何をどうすべきかについては明らかとなっていないのが現状である。

そこで、燃費に着目したシミュレーション技術と共に、最適な仕様を特定するための指針を構築して、燃費効果と開発課題を明らかにした⁽⁵⁾。

本稿では、シミュレーションの概要、熱電技術を用いた廃熱回生の課題、価値ある技術としていくためのコンセプトについて紹介する。

*四輪R&Dセンター

Table 1 Preconditions adopted for simulation

Precondition factors		Adopted precondition
Target of exhaust condition to be optimized		Average mass flow and temperature in US combined driving cycle
Evaluated vehicle	Type and engine displacement	STREAM 2.0L
System configuration	Heating source	Exhaust gas
	Cooling source	Coolant (90°C-3L/min. constant)
	Efficiency of voltage converter	85% constant
Heat exchanger	Sectional area of exhaust path	Equivalent to sectional area of exhaust pipe
	Fin volume	10% relative to exhaust path
	Fin material	Exhaust: SUS Coolant: Copper
Thermoelectric unit	Sectional dimensions of element	5 mm × 5 mm
	Gap between elements	1 mm
	Electrode size and material	5 mm × 11 mm × 0.5 mm Copper
	Module efficiency	45% constant

2. 燃費シミュレーション

Fig. 1にシミュレーションをおこなったシステムの概要図を示す。自動車の排気ガスを加熱源とし、冷却水を冷却源とした熱電発電システムを採用した。発電電力の燃費への影響は、車両の発電機負荷を軽減することにより、エンジンの負荷を減らすことで燃費を改善することを前提とし、システムを設置することにより発生する背圧と重量増加の影響も合わせて車両の燃費効果を算出した。シミュレーションをおこなうにあたり、Table 1に示す前提を採用した。

シミュレーションの流れを Fig. 2 に示す。

- (1) 評価に先立ち、熱電システムを最適化するための車両の運転条件を定義した。
- (2) 熱交換器のシミュレーションをおこなった。熱交換器の発生する単位温度差あたりの熱流束密度と圧力損失は、熱交換器のサイズやフィンの仕様によって影響を受ける。三次元 CFD を用いてそれらの仕様が熱流束密度へ与える影響を算出した。この段階においては、どのような熱交換器仕様が燃費に最適であるのか判断できないため、仕様を特定することなく、その特性をマッ

プ化した。

- (3) 熱電素子から有効な出力を得るためには、熱電素子を直列につないで熱電モジュールを構成する必要があるが、その際に損失が発生する。出力計算をおこなう上で、考慮すべき損失を、実際に熱電素子をモジュール化して測定をおこない、明らかにした。
- (4) 熱電モジュールの出力シミュレーションをおこなった。熱交換器から与えられる熱条件に対し、出力を最大にとるための素子厚さ寸法の最適化をおこなった。(2)で検討されたすべての熱交換器特性ごとに熱条件はことなるため、全仕様に対して寸法の最適化をおこなった上で出力特性をマップ化した。その際、(3)で検討した損失も考慮に入れた。
- (5) 熱電モジュールからの出力を有効に利用するためには、車両の要求電圧にあわせて電力を供給する必要があるため、DC-DC変換に伴う損失を、実際の変換回路を用いて測定し、燃費計算の中で考慮すべき損失を明らかにした。
- (6) 車両に電力を供給することによる燃費向上の効果、背圧をかけることによる燃費消費の増加を実車を用いて測定し、それぞれの因子の燃費へ感度を明らかにした。

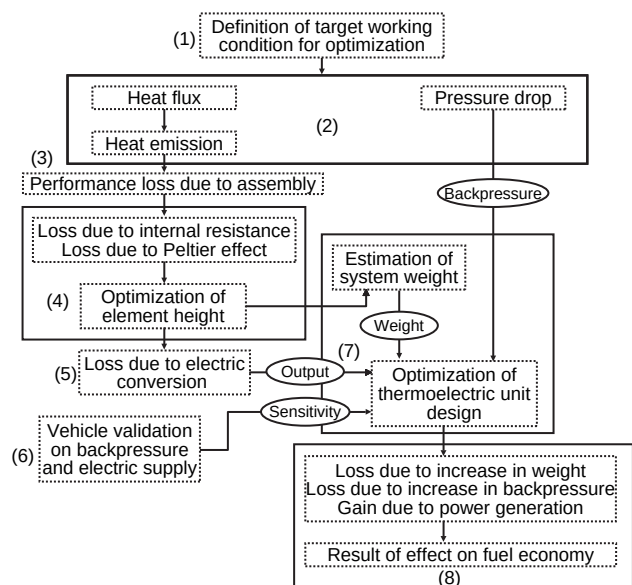


Fig. 2 Flow and factors considered in simulation

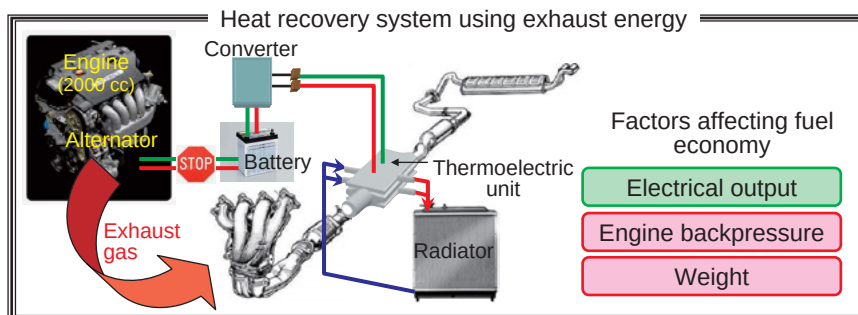


Fig. 1 General configuration of heat recovery system

Table 2 Effect of unrestrained specifications on factors affecting fuel economy

○: Has effect ×: No effect

Unrestrained specifications		Elements affecting fuel economy		
		Engine backpressure	Generated power	System weight
Heat exchanger	Fin pitch and thickness	○	○	×
Thermoelectric unit	Number of elements	○	○	○
	Element thickness	×	○	○

(7)以上の検討から得られた情報を既存の燃費シミュレーションコードに反映し、すべての燃費影響因子を考慮して、目的とする運転条件において最大の燃費効果を発揮する最適仕様を特定した。

(8)特定した最適仕様を用いて、さまざまな運転モードに対する燃費効果を計算し、熱電技術を用いた自動車の燃費向上効果を明らかにした。

先に述べたように、自動車の燃費は、熱電素子の発電出力、排気圧損、システム重量の三つの因子によって算出される。Table 2は、シミュレーションにて自由度を持たせる仕様と、それらの各因子への影響についてまとめたものである。各仕様は、複数の燃費影響因子にまたがって燃費効果を決定しており、特定の仕様を順番に最適化することはできない。そこで、すべての仕様を特定せず、各因子への影響をマップ化する必要がある。構築したマップを用いて、すべての仕様の組み合わせにおいて燃費効果を算出し、最も燃費効果の大きい組み合わせを見出すことで、最適化された仕様を特定する手法をとった。

まず初めに、圧損因子に影響を与える熱交換器のマップ化であるが、熱交換器の熱流束性能は、排気圧損(フィンの細かさ)と素子数(熱交換面積)によって決定される。Fig. 3は、CFDを用いた熱交換器性能の解析結果をマップ化したものである。排気圧損の増加を許容すれば、熱流束性能は改

善するが、やがて平衡状態になることがわかる。また、素子数を増やすと単位面積あたりの熱流束は低下する傾向がわかる。

次に、出力因子に影響を与える熱電性能のマップ化であるが、出力性能は、熱電素子に発生する温度差、内部抵抗によって決定される。ここで重要となるのは、素子の厚さである。素子の厚さは、厚くすればより熱電素子の温度差が付き、より大きな起電圧を生むことになるが、同時に内部抵抗も増加し、素子から取り出せる出力を低下させる要因ともなる。熱交換器の仕様ごとに最適な厚さが存在する。Fig. 4は、熱交換器の仕様ごとに最適な素子厚さを設定し、出力性能をマップ化したものである。

熱電素子の個数には最適値が存在することがわかる。熱電素子の個数を増やすことで、起電圧を増加させる効果がある。しかしながら、熱交換器特性により、単位面積あたりに供給される熱流束が低下することで、その効果は素子数の数が増えるほど鈍化する。一方で、内部抵抗は素子の数に比例して増加し続けるため、起電圧上昇による正の効果と内部抵抗増加による負の効果のバランスがとれたところに最適な解が存在する。また、圧力損失の観点からは、フィン

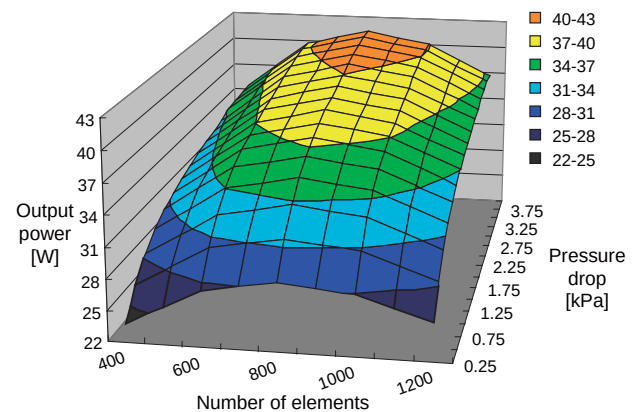


Fig. 4 Performance map of thermoelectric unit

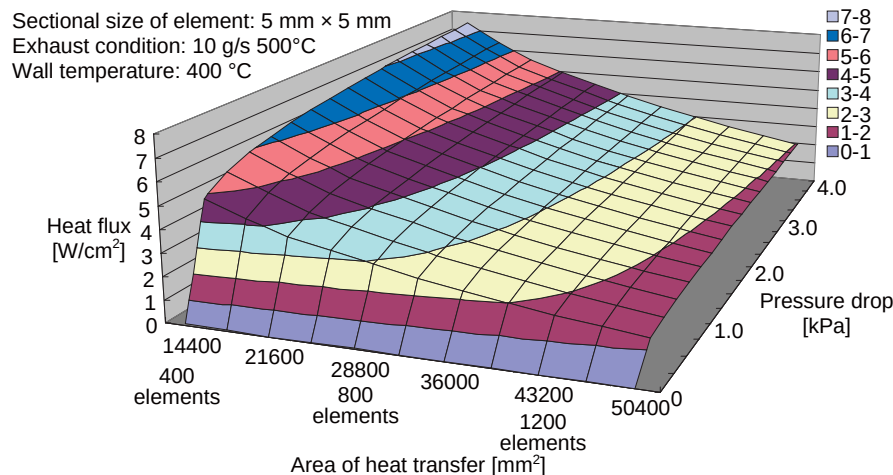


Fig. 3 Performance map of heat exchanger

を細かくすることで出力は伸びる傾向にあることがわかる。しかしながら、その効果は圧力損失の増加に対して、鈍化する傾向にある。

最後に、重量因子に影響を与えるシステム重量のマッピング化であるが、システム重量は、素子の個数と厚さ、素子数に見合う熱交換器の重量、電力変換ユニット、配管、冷却水重量、などによって決定される。Fig. 5は、熱電ユニットの素子数、厚さに対するシステム重量を整理したものである。素子の厚さが増すに伴いシステム重量は増大、また、素子数が増すに従いシステム重量が増すことがわかる。

熱交換器性能、熱電出力性能、システム重量について、ある単一の仕様を特定することなくマッピング化することで、三つの燃費影響因子である圧損、出力、重量を任意に組み合わせて燃費効果を検証できるようになった。Fig. 6に、USコンパインドサイクルでの平均の排ガス条件において、さまざまな仕様の組み合わせに対する燃費効果の算出結果を示す。圧力損失には最適値が存在することがわかる。これは、フィンが粗すぎると熱が回収できないことで発電が十分におこなえず、細かすぎると背圧上昇により、発電を上回るエンジンの効率の低下が発生しているためである。また同様に、素子の数についても最適な仕様が存在することがわかる。Table 3 に最適化された仕様を示す。システム重量は

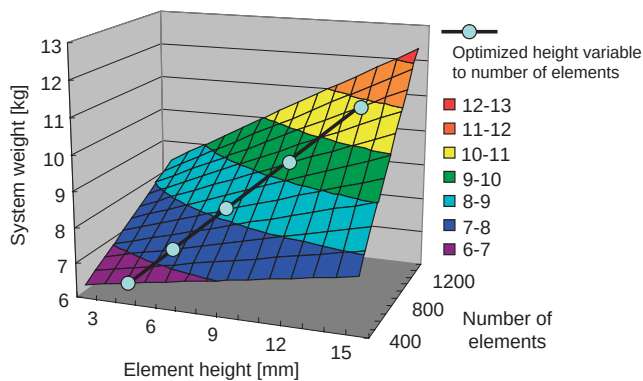


Fig. 5 Weight map of heat recovery system

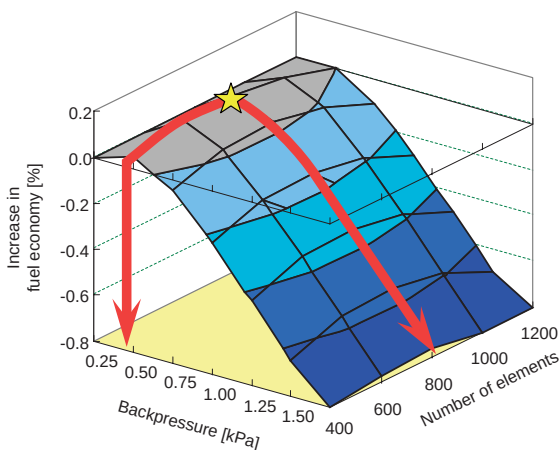


Fig. 6 Effect on fuel economy at target exhaust condition under various specifications

Table 3 Optimized specifications of thermoelectric unit

Hot side heat exchanger	Sectional size: 7 mm x 294 mm Fin specifications Fin thickness: 0.175 mm Fin pitch: 0.88 mm
Cold side heat exchanger	Sectional size: 2.5 mm x 294 mm x 2 paths Fin specifications Fin thickness: 0.03 mm Fin pitch: 0.2 mm
Element size	5 mm x 5 mm x 8.6 mm x 800 pieces
Unit weight	4.2 kg
System weight	8.3 kg

Table 4 Effect of thermoelectric generator on fuel economy

	Increase in fuel economy	Reduction of CO ₂ per km
	%	g/km
LA4	0.13	0.2
HWY	0.36	0.42
SC03	0.15	0.24
US06	0.08	0.14

8.3kgであり、車両搭載に適したコンパクトなデバイスであることがわかる。Table 4に最適化された仕様の熱電発電システムを用いて、さまざまなモードに適用した場合の燃費効果を算出した結果を示す。自動車に適した搭載性は期待できるものの、現状の熱電技術を用いた廃熱回生では、燃費効果はほとんどないことがわかった。

3. エネルギー収支に基づく損失の分析

Fig. 7 に LA4 におけるエネルギー収支を示す。

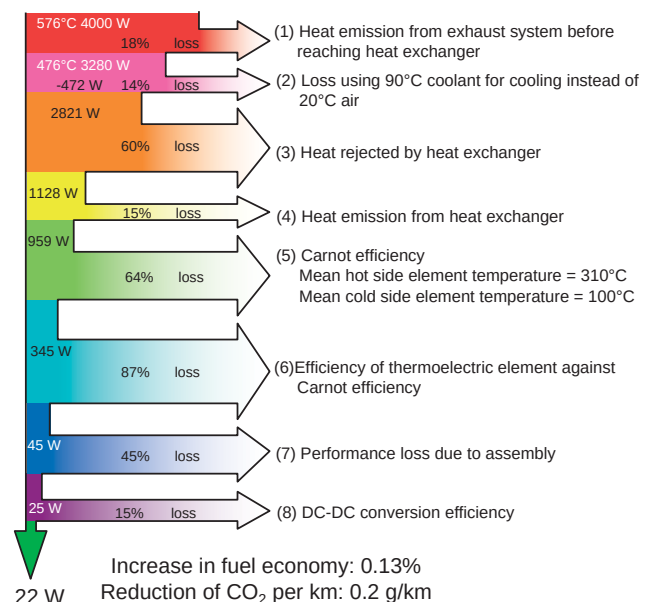


Fig. 7 Analysis of energy flow in LA4 driving cycle

まず初めに、素子の変換効率が低いことがわかる〔Fig. 7 (6)〕。Fig. 8に今回用いた素子の温度特性と、モード中に活用した素子温度を示す。最大の素子性能が得られる温度帯よりも低い領域で使用されていることがわかる。これは、Fig. 6に見られたように、素子の温度を上げようと熱交換器のフィンを細かくすると、熱電ユニットの出力は高まるものの、排気圧損が打ち勝って燃費が向上しないためである。100℃から350℃付近で性能を発揮する素子が必要とされるが、現在、その温度領域で性能を確保できる素子は存在せず、自動車の廃熱回生には、より低温域に適合する素子の開発が鍵となる。

また、本解析とは別に、実験から素子を接合する際に発生する素子へのダメージも損失の大きな部分を占めることがわかっている。熱電モジュールとして素子を接合するためにロウ付けをおこなっているが、素子へのロウ材の拡散、ロウ付け時の成分の揮発等により、45%程度の素子性能の低下が発生しており、それらの防止が効果的である〔Fig. 7 (7)〕。加えて、実機を使った排ガス系の温度測定の結果から、熱電ユニットに到達する前に放熱により18%程度エネルギーを失っていることもわかっており、こちらの対策も有効であると考えられる〔Fig. 7 (1)〕。

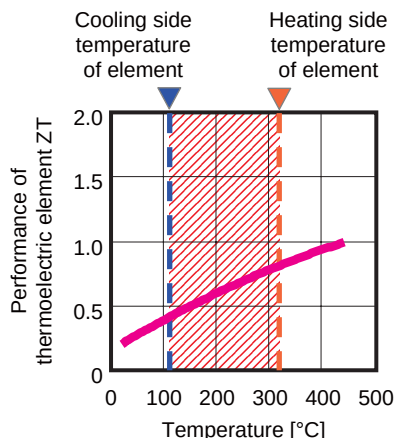


Fig. 8 Performance of thermoelectric element relative to temperature

4. さらに燃費効果を高めるためのコンセプト

前述では、エネルギー収支から見た改善箇所を提示したが、その他にも熱電システムの活用方法を工夫することにより燃費効果を向上させることが可能である。前述のような一般ガソリン車に熱電システムを適用する場合、三つの課題が発生している。

Fig. 9 は、LA4 モードを走った場合の一般ガソリン車と高負荷定点運転を前提とするシリーズハイブリッドの排気温度と、熱電の出力への影響を示している。今回評価した2.0L STREAM では、LA4 モードを走るために10kW程度の平均出力を必要とする。シリーズハイブリッドについて

は、排気量0.65Lのエンジンを使って、機関の最高効率点を維持しながら定点運転させ、走行に必要な平均出力を得る前提を採用した。また、一般ガソリン車は、2.0L STREAMを実際に走らせて測定した平均の排気温度を用いた。高負荷定点運転のほうで、排気温度が高く、効率的に熱を電気に変換できることがわかる。

Fig. 10に、排ガス条件が変動した場合の燃費への影響を示す。熱電ユニットは、最適化された流量において最大の燃費効果を発揮することがわかる。一般ガソリン車は、モード中に排ガス条件が変動するため、最も頻度の高い条件に合わせて最適化される。しかしながら、常に最適化された条件下を維持することは不可能であり、効率は低下する。高負荷定点運転においては、排気条件の変動が無いいため、常に最適化された条件で使うことが可能となる。

Fig. 11にモード走行中の熱電の出力のイメージを示す。一般ガソリン車は、モード中に排気条件が変動するため、熱電からの出力電圧もそれに準じて変動する。車両の要求する電圧は一定であり、電圧のミスマッチが生じた場合には、昇圧や降圧といった電圧変換が必要となる。よって変換時に電力の損失が発生することになる。一方、高負荷定点運転においては、排気条件の変動が無いいため、あらかじめ熱電の出力を車両の要求電圧になるように設定することで、15%程度の変換損失を排除することが可能となる。

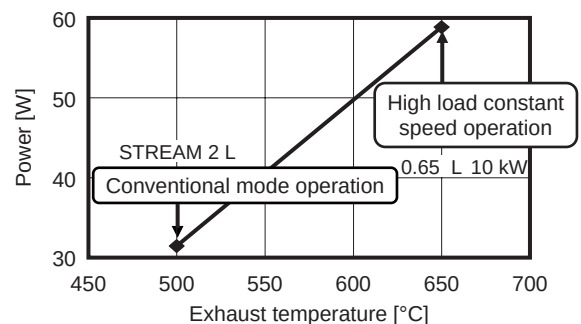


Fig. 9 Effect on output of thermoelectric unit due to difference in exhaust temperature

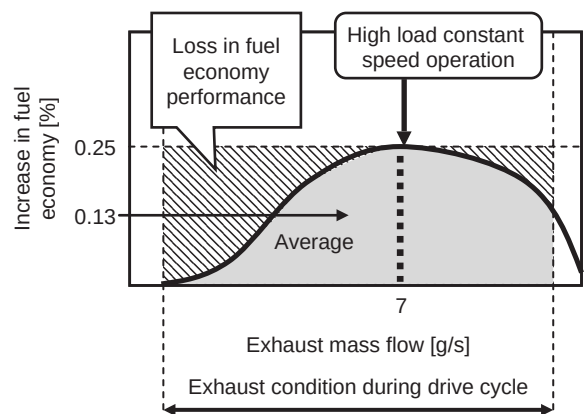


Fig. 10 Effect on fuel economy relative to exhaust mass flow

参考文献

- (1) Rowe, D.: Thermoelectric Handbook Macro to Nano, CRC Press, p. 52-1- 52-11(2006)
- (2) Crane, D., Bell, L.: Design to maximize performance of a thermoelectric power generator with a dynamic thermal power source, ASME 2007 ES2007-36210
- (3) LaGrandeur, J., Crane, D., Hung, S., Mazar, B., Eder, A.: Automotive waste heat conversion to electric power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe, Proceedings of the 25th International Conference on Thermoelectrics, p. 343-348(2006)
- (4) LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A.: Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery, Proceedings of the 11th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference(2005)
- (5) Mori, M., Yamagami, T., Oda, N., Hattori, M., Haraguchi, T., Sorazawa, M.: Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative to Fuel Economy, SAE Paper, 2009-01-0170(2009)

Fig. 12に、エネルギー収支から見た改善箇所、使い方の工夫を総合的に対策した場合の燃費効果の向上を示す。シリーズハイブリッドを前提に高負荷定点運転をおこない、排気温度の高温化、排気圧損の最適化、および出力電圧一定の元でシミュレーションをおこなった結果、一般ガソリン車に適用した場合と比較し、燃費効果は約2倍になるとの結果を得た。また、100℃から350℃の範囲において平均して ZT1 以上を確保できる素子開発、接合時の損失を 15% 以内に抑える手法の確立をはじめ、システムの活用方法の工夫や、断熱対策を施すことによって、燃費を 3 %程度向上できる可能性があるとの見解を得ることができた。

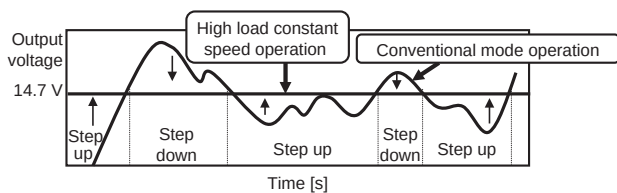


Fig. 11 Image of output voltage of thermoelectric unit during drive cycle

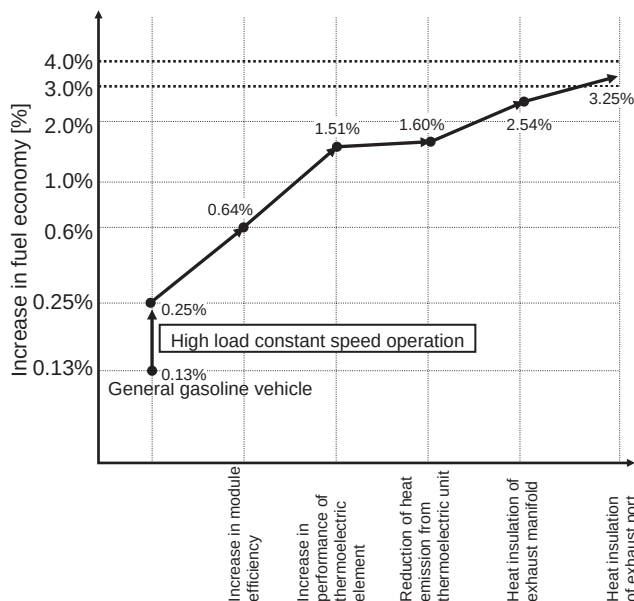


Fig. 12 Future potential of thermoelectric technology for fuel economy

5. まとめ

熱電素子を利用した車両用廃熱回生システムの燃費シミュレーション技術と指針を構築し、

- (1) 現状の熱電技術を活用した場合の効果および課題を明らかにした。
- (2) 鍵となる技術、改善手法の抽出に加え、最適な使い方を特定し、それらの対策を採用する前提でモード燃費向上を見積もると、3 %程度の向上を期待できることが明らかになった。

■ 著 者 ■



森 正芳



山上 武



織田 信之



服部 真



原口 友秀



空澤 光将