

1. 熱管理・排熱の有効利用技術の開発が求められる背景

自動車の保有台数は先進国で飽和状態に近づきつつあるが、モータリゼーションの途上にあるBRICsをはじめとした新興国では今後さらに台数が増加することが予測される。そのため、これまでの大都市域の排出ガス問題に加え、最近では地球規模でのCO₂問題に発展している。

このような社会情勢を受け、日米欧に限らず図1のように世界各国で燃費/CO₂排出規制が導入され、その規制値は年々厳しくなっており、その規制対応が我々自動車の生産に携わる者にとって最大の課題となっている。本稿では、この課題に対して重要な役割を担う自動車の熱管理・排熱の有効利用について、その要素技術と課題、今後の開発指針について紹介する。

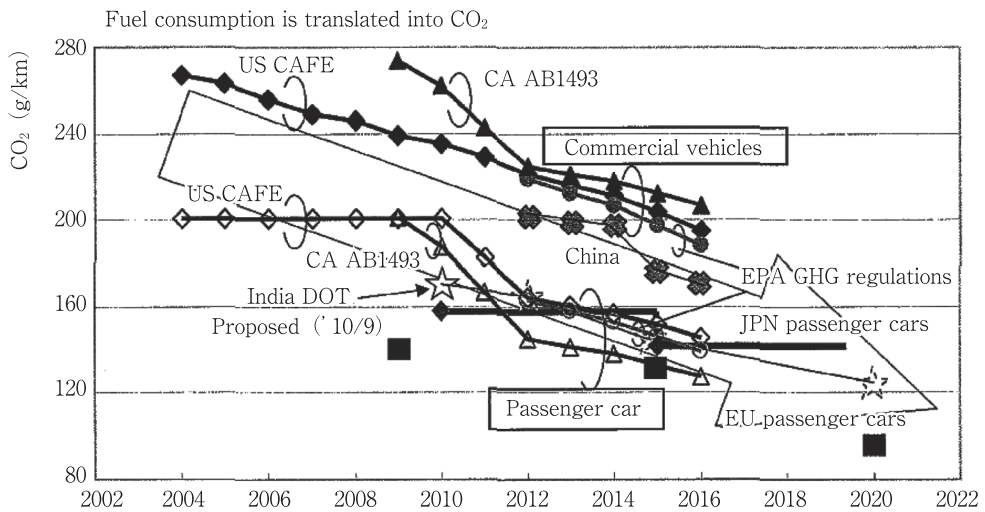


図1 各国のCO₂排出規制¹⁾

2. 熱管理・排熱の有効利用のために必要な要素技術

自動車の実走行燃費悪化の要因として、路面状況や平均車速等があるが、大きな要因の一つとして季節性があげられる²⁾。図2のように季節や地域によって実走行燃費が大きく変動することがわかっており、室内を冷房するエネルギーが必要となる夏季(6月~8月)や、エンジンや室内を暖機するためにエネルギーが必要となる冬季(12月~2月)には、春・秋に比較して燃

費が悪化する。このような実走行燃費の季節変動は、ハイブリッド車のように走行に必要なエネルギーが小さい車程影響を受けやすい。

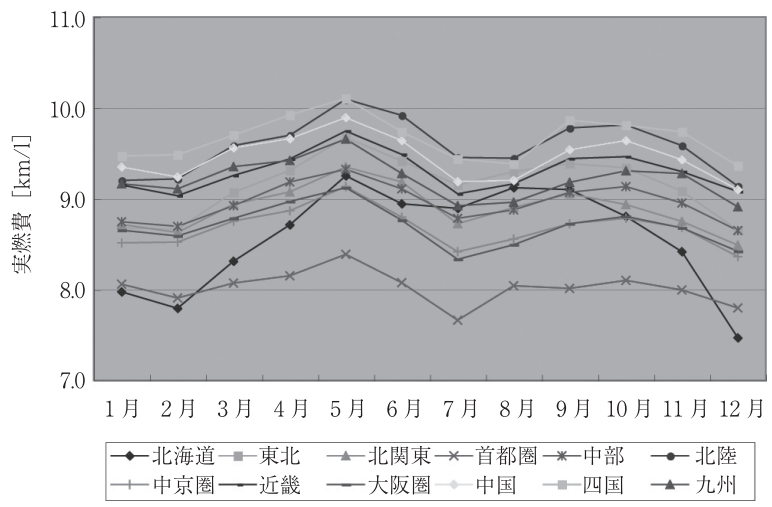


図2 乗用車の月別実用燃費³⁾ (カラーの図は巻頭ページに掲載)

冬季の燃費悪化要因について、ハイブリッド車で市街地走行した場合のエネルギー解析を、エンジン暖機後と暖機前で行った結果を用いて示す。図3のように暖機後では頻繁にエンジンストップが行われているのに比べ、図4のように暖機前かつ暖房ON時では、エンジンを暖機するため、またエンジン冷却水を使って車室内の暖房を行うため、ほとんどエンジンストップできず、これが燃費悪化の主たる原因となっている。

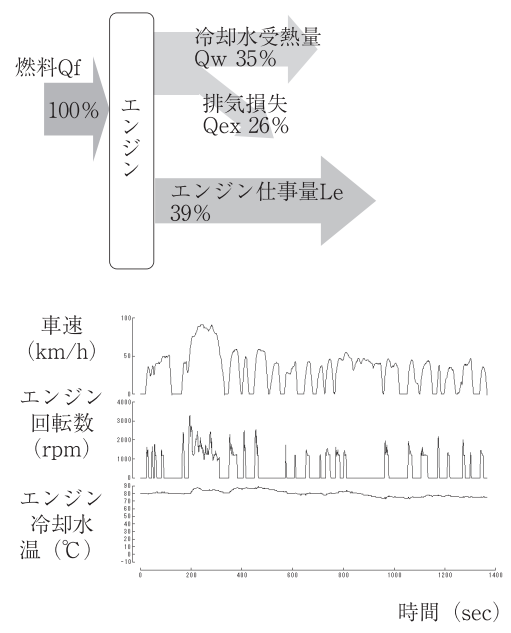


図3 暖機後のエネルギー解析結果³⁾

第1章 小型・搭載性に優れたランキンサイクルシステムの開発と 実車搭載における発電性能評価及び実用化への道筋

山根健オフィス(ビー・エム・ダブリュー(株)) 山根 健

1. 排熱を最大限に回収することを目標に設計した第一世代ランキンサイクルシステム

自動車に使用されているガソリン機関やディーゼル機関の正味熱効率は30%程度であり、供給される燃料の多くの部分は、利用されることなく排出されている。一方、大型船舶や火力発電所で使用されている機関の多くは熱効率が50%を超す高効率を示している。その要因としては次が挙げられる。

- ・ エンジンの運転領域が狭い範囲であり、エンジンの仕様をその使用領域に最適化することができるため、運転領域の熱効率が高くなる。
- ・ 高効率発電所や船用機関の多くが、排熱回収システム、具体的には排熱ランキンシステムを搭載しており、主機と排熱回収システムを合わせた総合効率で高い熱効率を示している。
- ・ 発電所や大型船舶では排熱回収システムの搭載上のサイズの制約は少なく、また十分な放熱用の冷熱源の供給が期待できる。

一方、自動車では熱効率の追求と同時に、車載装置の重量やサイズの制約が大きく、それらのバランスが重要である。

これまでも自動車等の排熱回収システムの研究は数多く行われてきており、代表的なものとしては、排気ターボ過給、ターボコンパウンドシステム(排気タービンで動力を回収し、クラック軸にその動力を戻す-特に「断熱エンジン」と組み合わせられて研究が行われていた)、水やその他の作動流体を用いた排熱回収ランキンシステム、スターリングエンジンを用いた動力回収システム等が見られた。

1.1 システム構造/装置構成・車載システム構成

BMWでは、排熱回収のポテンシャルを評価するために、車載可能なサイズで最大限の排熱回収が可能なシステムを設計した。すなわち、

- ・ 主要な排熱源として、排気熱と冷却水熱を使用する(潤滑油熱は水冷熱交換器により冷却水として利用できる)。
- ・ 熱媒体は、安定性、入手性等を考慮して水とした。
- ・ 回収されたエネルギーは動力として直接エンジンに戻すことにし、容積型膨張機を用いる。

・ システムをシミュレートした結果、二系統のランキンサイクルループを構成して、異なる利用温度範囲を設定することにより、最も回収効率が高くなることが明らかとなった。
以上の設計により、**図1**に示す車両搭載二系統ランキンシステムを構成した。

図示のように、エンジン駆動の水ポンプで昇圧された水を熱交換器で昇温、蒸気として容積型膨張機に導入、発生した動力はベルトを介してエンジンクランク軸に戻す。膨張機から排出された低温蒸気はコンデンサで復水される。

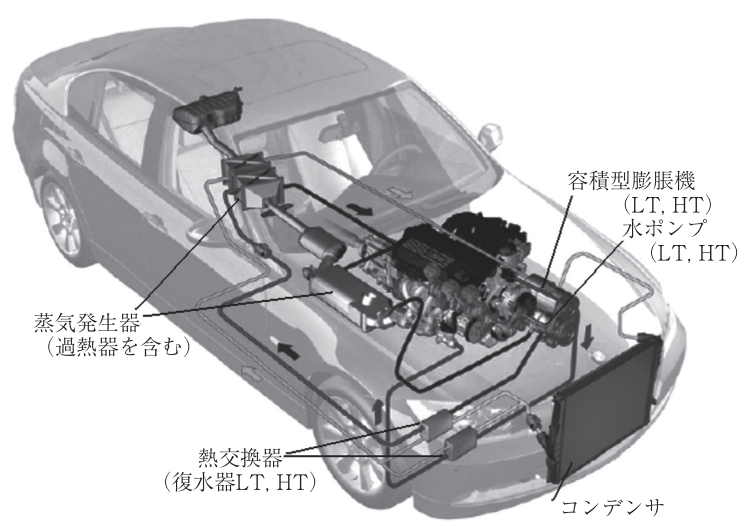


図1 車両搭載二系統ランキンシステム

図2にシステム構成を示す。図示のように独立した二系統で構成されている。
図3には低温(LT) ループを示す。LT水ポンプで昇圧された水は蒸発器でエンジン冷却水の高温サイド及びHTサイドの膨張機排出蒸気による熱で蒸発する。その蒸気部分を取り出し、エンジン排気熱を用いたLT過熱器で過熱蒸気となる。過熱器熱量に余裕があり、膨張機の出力要求量が大い場合には、蒸発器の液相部分を独立した水ポンプでLT過熱器の途中に噴射することによりLT蒸気量を増加させることができる。LT膨張機で動力を取り出したのち排出された低温蒸気は、LT復水器で復水する。この復水器の冷却は空冷の復水器冷却系の冷却水で行われる。

図4には高温(HT) ループを示す。水タンクから取り出された水は、水ポンプで昇圧されたのち、排気管に対し対向流で三段の熱交換により過熱蒸気となり、HT膨張機で動力を取り出す。膨張後の低温蒸気は蒸発器で熱交換したのち、HT復水器で水となり水タンクに戻る。

第3節 熱電発電システムの設計とディーゼルエンジン EGR 配管への導入・性能評価

(株)KELK 藤本 慎一

1. 自動車排熱回収システムの研究開発の背景・経緯

自動車の全燃料エネルギーから得られる軸出力エネルギーの割合は、ガソリンエンジンでは20～30%程度、ディーゼルエンジンでも30～40%程度であり、残りのほとんどのエネルギーが未利用のまま廃熱としてラジエーターや排出ガスから外部に捨てられている(図1参照)¹⁾。この未利用熱エネルギーの一部を電気エネルギーとして有効に利用することにより、燃費向上による化石燃料使用量削減、及び、温室効果ガスであるCO₂の排出量抑制が期待できる。

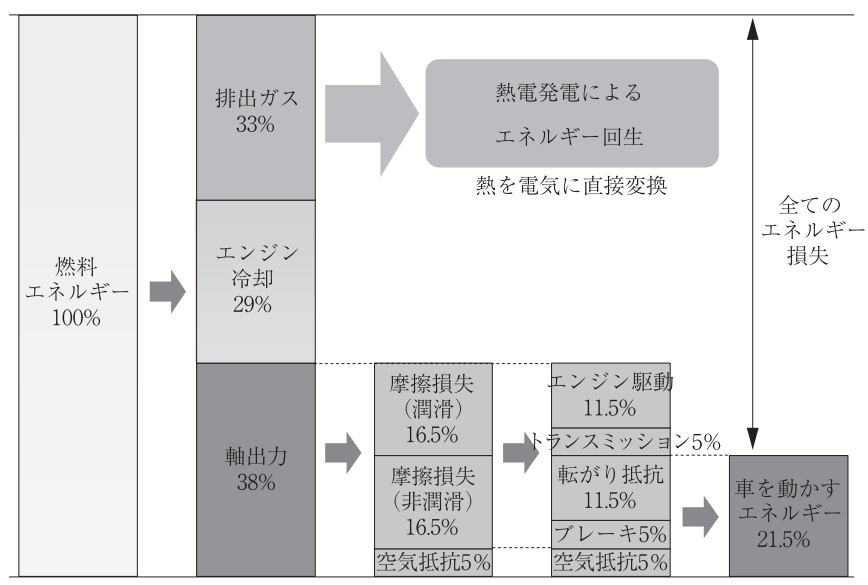


図1 自動車用ディーゼルエンジンにおける燃料エネルギーの内訳¹⁾

自動車の排熱エネルギーからエネルギー回生する手段として、これまで、ターボコンパウンド²⁾、ランキンサイクル、スターリングエンジン、熱電発電等による手段が検討されているが、単なる燃費向上手段と考えた場合、いずれの手段も割高である上、積極的に車載用製品開発を推進するメーカーも少なかったため、本格的な普及には到っていない。しかしながら、近年、エンジン性能の向上とともに簡便で効果的な燃費向上手段が乏しくなってきたこと、社会

全体の環境に対する意識が高まってきたことにより、熱電発電をはじめとする排熱からのエネルギー回生技術に取り組む動きが活発になってきている(図2参照)³⁾。

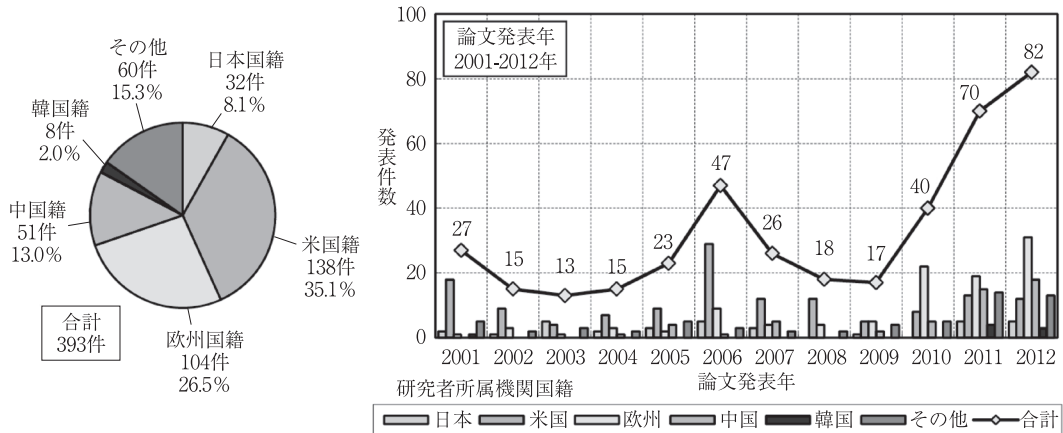


図2 熱電変換システム・発電装置の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び、論文発表件数比率(論文発表年：2001-2012年)³⁾(カラーの図は巻頭ページに掲載)

一言にエネルギー回生技術といっても、各々の技術ごとに原理が全く異なり、一長一短があるため、排反事象を考慮し、適材適所で用いる必要がある。自動車の排熱エネルギーを回生する場合、カルノー効率の観点から、比較的高温の排出ガスエネルギーを利用するのが最も効率がよい。しかしながら、排出ガスエネルギーを利用する場合、排反事象として、エネルギー回生システム分の重量増加による燃費悪化、排気配管に適用した際の圧力損失、熱交換の際に必要な放熱のためのエネルギー損失等を伴うため、これらを十分に上回るエネルギー回生が必須条件となる。さらに、エネルギー回収後の排出ガス温度の極端な低下は、特にディーゼルエンジンの場合には、DPF等排気配管経路のPMによる目詰まりの助長、尿素SCRの機能低下等、さまざまな影響が発生することも十分に考慮する必要がある。自動車の居住空間や積載性、デザイン性の観点から、ある程度コンパクトであることも重要な要素である。

以上の排反事象を鑑みて、ディーゼルエンジンにおいて、十分な排出ガス温度が確保でき、エンジン性能への悪影響が少ないと考えられる部位への熱電発電システムの適用を検討した。ガソリンエンジンと比較してディーゼルエンジンの排出ガス温度は低いため、特に排出ガス流れの上流での適用が必要となる。エンジン性能への影響も考慮した結果、EGR配管、ターボチャージャの直下が候補として考えられた(図3参照)。特にEGRクーラは、NO_x低減の目的から高温の排出ガスを水冷し、積極的にEGRガス温度を低下させている箇所でもあり、EGR

第2節 排熱回収による燃費・暖房性能向上の現状と今後の取り組み課題

(株)三五 西野 寿

はじめに

世界各国において燃費や排気ガス規制強化が進んでおり、自動車の燃費向上及び排出ガスの削減が益々重要課題となっている。この状況に対応技術の多様化が進んでおり、ハイブリッドや過給ダウンサイジング、アトキンソンサイクルといったパワートレーン技術による燃費向上、熱マネジメントやフリクション削減、電力消費削減といったロスエネルギーの再利用や削減技術が挙げられる。熱マネジメント技術は、トランスミッション暖機や排熱回収等排熱を利用した技術が採用され始めており今後もニーズが拡大することが予想される。本稿でいう排熱回収器とは排気ガス熱をエンジン冷却水へ熱交換するシステムをいう。

排熱回収は近年ハイブリッド車に採用され排熱回収器として実用化しており、燃費向上や暖房性能向上技術として定着しつつある。

本稿では排熱回収器の具体的構造と燃費向上事例を紹介し、今後益々の排熱利用技術の発展に繋がることを目的とする。

1. 自動車の排熱エネルギー

1.1 各パワートレーンのエネルギー事情

1.1.1 ガソリンエンジン

図1にガソリンエンジンのエネルギー使用状況を示す。

ガソリンエンジンでは燃焼エネルギーの約70%が熱損失しており、ラジエーターによる放熱や、エンジン本体からの放熱として捨てられている。排気による熱損失も30%に達しているがそのほとんどが放熱や放出といった形で捨てられている。

快適性のために暖房熱が必要な場合は、冷却水の温水を利用し暖房熱として利用していることは代表的な排熱エネルギーの再利用であるが、近年のガソリン内燃機関はアトキンソンサイクル等熱効率向上により燃費を向上させる技術が投入されている。エンジンの熱効率向上により排熱エネルギーが低下し暖房熱の不足が課題となっている。現状実用化されている暖房熱不足の対応技術としてはPTCヒータ装着やHVACの一部内気循環による換気量削減、アイドル

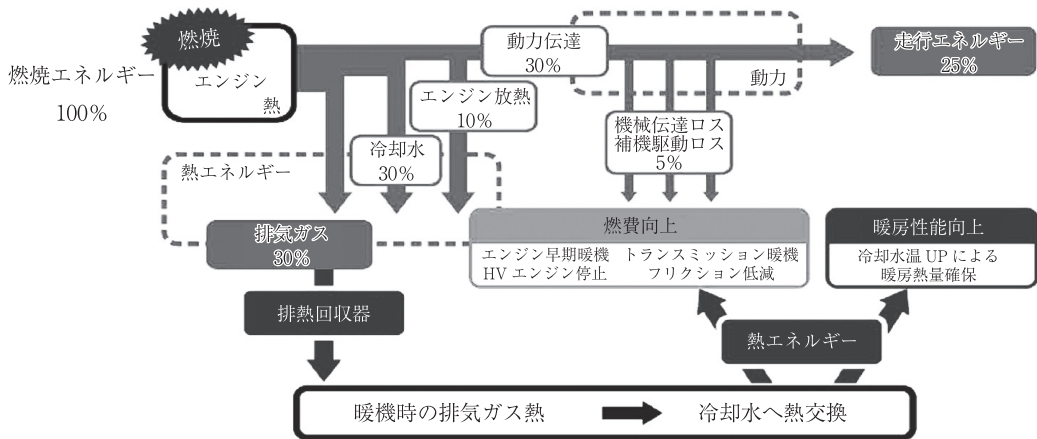


図1 ガソリン自動車のエネルギー使用状況と排気熱エネルギー利用アプローチ

回転数UPによる熱量増加等が挙げられるが、寒冷地等では複数の技術を用いて暖房熱量を確保しているためコストUPも課題となっている。

1.1.2 ハイブリッドシステム(ガソリンエンジン+モーター)

ハイブリッドシステムをパワートレインとした車両においては、走行エネルギーをモーターに依存する率を増やし、燃料消費を削減する取り組みが盛んになってきている。その背反として、走行時の暖房熱供給が不足するためエンジンが暖房熱供給のために運転を継続する事態が発生している。冬季においては顕著であり、季節により燃費の差が生じる要因のひとつとなっている。これらの課題は車両の商品性を示すモード燃費では発生しえないが、ユーザーの実際の使用環境で発生している。このことからユーザーが実際に使用する環境において、燃費を犠牲にせず暖房熱を供給する技術が今後も基本技術として求められることには変わりはないと考える。

1.1.3 ディーゼルエンジン

ディーゼルエンジンは熱効率が40%程度であり、排熱エネルギーはガソリンエンジンに比べると少なく暖房熱が不足する傾向がある。近年は快適性向上のためPTCヒータ等暖房能力向上技術が積極的に採用されている。ディーゼルエンジン搭載車両は快適性向上や後処理浄化システム採用によるコストUPが課題となる中、快適性向上のためにエネルギー源を必要としない排熱再利用は注目され、乗用車クラスにおいて排熱回収器が実用化された。しかし現状は後処理浄化システムやターボチャージャーにより排気熱の多くが消費され、その後流の排気ガス温度が低下した環境では費用対効果が見合わない状況である。

1.2 排熱回収器とは

各パワートレインによる排熱量と暖房熱不足の状況を示したが、自動車の排熱において最も質が高いエネルギーは排気ガス熱と考える。排気ガス熱はエンジン始動直後においては冷えたエンジンヘッドや排気マニフォールド自身への熱消費、触媒活性化のために使われるため、数十秒程度は排気熱利用が難しいが、その後は徐々に排気熱が上昇し床下触媒直後の排気ガス温度は200～600℃といった高温の熱を有するため熱利用としては高いポテンシャルを有する。

図2は床下触媒直後の位置で始動直後からの排気ガス温度上昇を示した一例である。この高温の排気ガスを暖房用熱源であるエンジン冷却水へ熱交換しエンジンと共に冷却水の暖機を促進させるシステムを排熱回収器という。図1に示したように冷却水への熱損失と排気熱はほぼ同じ熱量がある。この排気熱をすべて冷却水へ回収させれば従来の2倍の熱量で冷却水を加熱することとなりエンジン暖機の短縮が可能となる。図3は排熱回収器による冷却水温度上昇効果を示したものである。

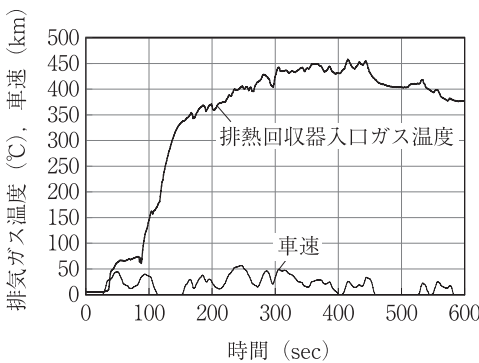


図2 エンジン始動直後からの排気ガス温度上昇

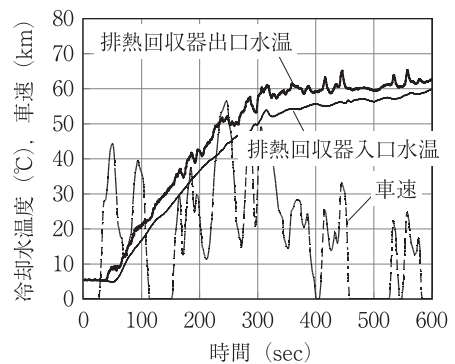


図3 排熱回収器による水温上昇

排熱回収器は図3に示すように冷却水へ排気熱エネルギーを渡すことで、エンジン暖機を促進させる。その原理について説明する。

エンジン暖機過程ではエンジンヘッド等シリンダー周辺部品の温度が低いため、シリンダー内の温度も低い状態である。そのため燃料が気化しにくく希薄燃焼状態に対して燃料増量傾向にある。また触媒暖機のため遅角制御が入る等安定した理想燃焼状態に向けて暖機が行われていくが、この間、燃料増量制御がされる等結果的に燃費悪化の要因となっており、できる限り早く暖機過程を完了することが望ましい。

暖機が完了する判断として一般的にエンジン水温をモニターしており、暖機完了水温までいち早く上昇することができればそれだけ燃料消費を減らすことができる。図3に示す排熱回収

第2節 燃料改質による排熱回収システムと改質燃料によるエンジンサイクル効率の向上

(株)日立製作所 島田 敦史 石川 敬郎

1. 燃料改質による排熱回収システムの概要

内燃機関は自動車をはじめ、幅広い動力源として利用されている。自動車においては電動化が進むものの、IEAの予測では、30年後においても約半分以上の自動車は内燃機関が動力源として利用され、世界の石油エネルギーの約50%は自動車が消費するとしている。そういった中、日本では内燃機関の効率50%を目標に戦略的イノベーションプログラムが立ち上がり¹⁾、内燃機関の高効率化は加速されると予測される。

自動車のエネルギーフローを図1に示す。現状の自動車に搭載される内燃機関(エンジン)は、供給燃料エネルギーの約30~40%が動力に変換され、その約50~60%は排熱となる。動力変換効率を高めるために、モータとのハイブリッド化や、エンジンの燃焼改善(高圧縮比燃焼、希薄燃焼等)、機械損失改善等が取り組まれている。また損失エネルギーの大きな排熱を回収し、動力に変換する技術についてもさまざまな取り組みが行われている。

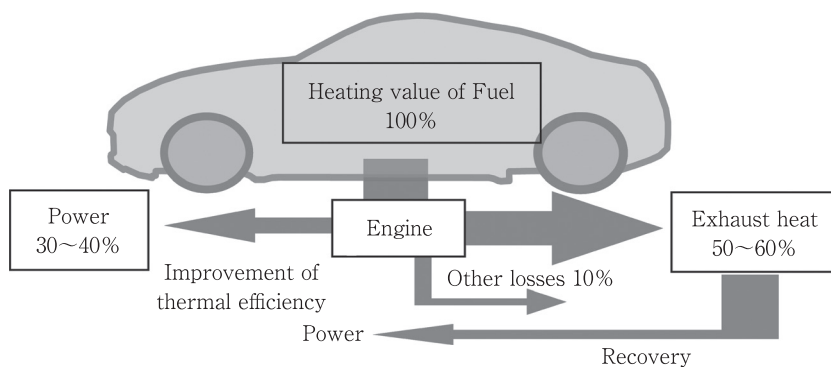


図1 自動車のエネルギーフロー

図2に各種排熱回収技術の比較を示す。実用化されているターボシステムは排熱エンタルピーを吸気圧縮動力として回収し、エンジンをダウンサイズ化することで熱効率を高めることができる。欧州を中心に直接燃料噴射方式とターボを組み合わせたシステムが採用されている。

比較的小型の排熱回収システムとして熱電素子の研究、開発が行われている²⁾。熱電素子はゼーベック効果を利用して温度差から発電する手法であり、複雑な変換装置が不要となり小型化できる。材料選定、自動車への実装手法の検討等の実用化を目指した検討が行われている。

ランキンサイクルは大規模な火力発電に利用されており、燃費改善効果が大きい。自動車への適用を検討した例はあるものの³⁾、膨張器や圧縮機、凝縮器等構成部品が多くなることから、実用化に至っていない。

これらに対し、燃料改質は排気熱を利用して化学反応により熱を回収する手法であり、比較的小型で燃費改善効果の高いシステムである^{4,5)}。

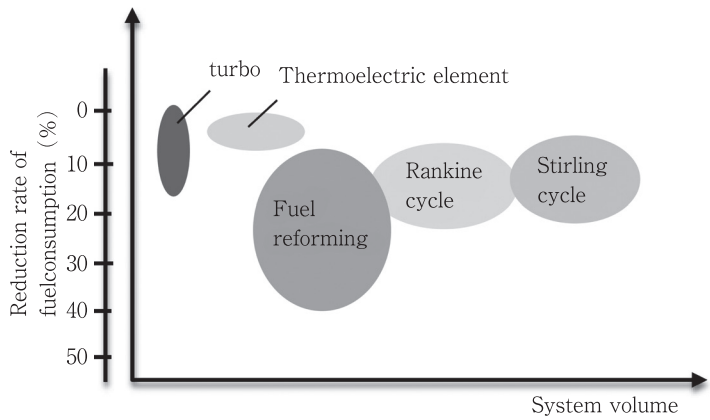


図2 各種排熱回収システムの比較

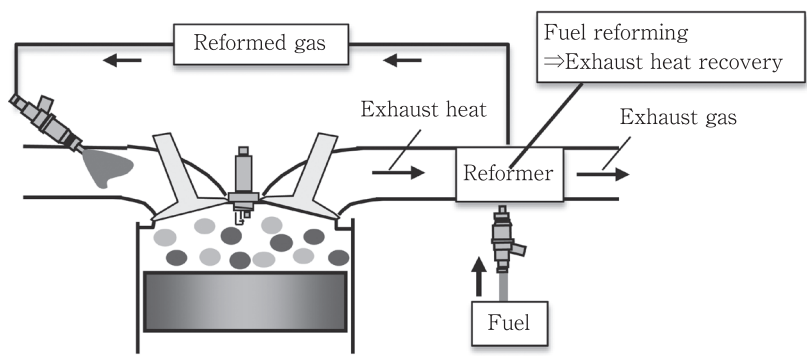


図3 燃料改質を利用したエンジンシステムの概略図

燃料改質を利用したエンジンシステムの概略図を図3に示す。エンジンの排気管に触媒が充填された改質器を搭載し、エンジンの排気熱を供給する。排気熱により加熱された改質器に燃

第5章 液体ピストン蒸気エンジンによる排気熱からの電力回収システム

(株)デンソー 八東 真一 小田 修三 新山 泰徳
東京大学 鹿園 直毅

はじめに

地球温暖化や化石燃料の枯渇等の顕在化を背景に、エネルギー利用効率向上の重要性が高まっている。地球温暖化への影響が大きいCO₂の排出において、運輸部門の排出量は日本全体の排出量の約20%を占める¹⁾。このため、自動車の燃費向上も我が国のCO₂排出量の削減に大きく貢献することができる。自動車の消費エネルギーの内訳は、走行30%、排気熱30%、冷却水からの排熱30%、その他10%ということが知られており^{2,3)}、約60%が排熱として捨てられている。この排熱を変換して電気に再生できると、これから増加する自動車内の電力消費に対応しやすいことから、排気熱を再生する排熱発電システムはエネルギーを有効利用するための中核技術である。一方で、軽量化や内燃機関の効率向上による排気ガス温度の低下から、排熱発電システムを自動車に搭載するためには、動作温度、熱効率、重量、コストの面で、従来の排熱発電システムでは達成困難な非常に厳しい課題を克服する必要がある。そこで、我々は300℃以下の温度領域で図示熱効率10%以上を目指し、単一可動部を有する簡素な構成の液体ピストン蒸気エンジンを提案し、その高効率化を進めてきた⁴⁾。本稿では、その構成や高効率化への取り組み、そして自動車に搭載した場合の燃費向上効果の見積もり⁵⁾を述べる。

1. 排気ガス熱を利用した排熱発電システムの目標と現状

図1に、排熱発電システムの動作温度と効率の現状⁶⁻¹²⁾と目標を示す。本研究では、小型を対象としているため、10 kW以下のものを中心にプロットした。カルノー効率は、低温側の温度を20℃とした。スターリングエンジンは、高温では30%近い効率が出せるが、低温での効率は大きく低下する。動作温度が600℃から400℃に下がると急激に効率が落ちるのは、気体である作動流体と加熱部との間に大きな温度差がついてしまうことに起因する。蒸気エンジンが、200℃付近でもスターリングエンジンの400℃付近とほぼ同等の効率が出せるのは、相変化を利用して作動流体と加熱部の温度差を小さくできるためである。オーガニックランキンサイクルは、水よりも低沸点の作動流体を用いて動作温度100℃で7%近い効率を出せるが、作動流体の分解の問題等で200℃以上での利用は難しい。熱電素子は、どの温度帯でも10%を

超えるものはまだ出ていない。以上のように、400℃以下では、どの排熱発電システムでも7%程度の効率しか達成できておらず、300℃で熱効率10%を超えることの難しさがわかる。

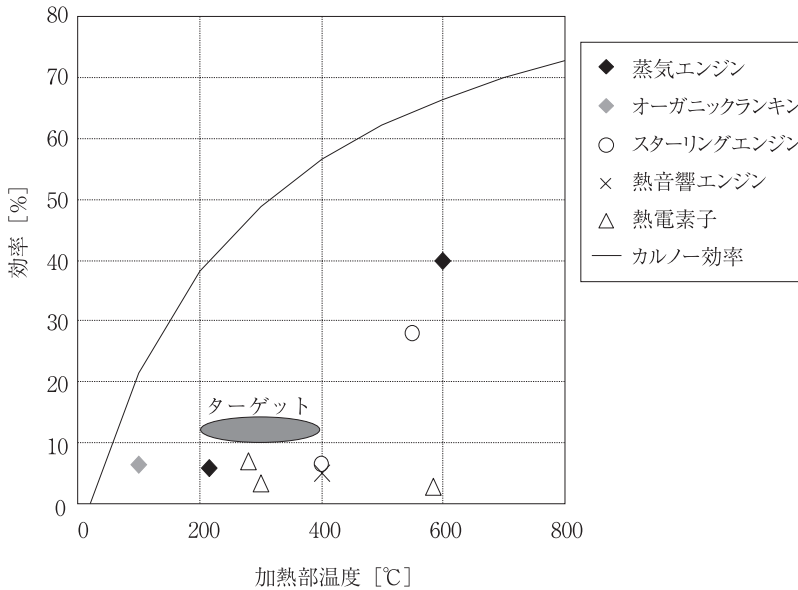


図1 排熱発電システムの動作温度と効率の現状と目標

2. 目標を満足する排熱発電システム実現のための考え方

これまで述べた通り、排熱を有効利用するための排熱発電システムを自動車に搭載するためには、300℃以下で図示熱効率が10%を超え、かつ軽量でなければならない。従来の外燃機関である蒸気エンジン、スターリングエンジン、熱音響エンジンや、熱電変換素子では、動作温度、図示熱効率、重量の目標仕様を全て同時に満足させることは困難である。そこで、低温度差である蒸気サイクルの長所を保ちながら、熱音響エンジンのような自励振動によって圧縮ピストンが不要になる簡素な機器構成を検討した。なお、排ガスへの適用を想定し200℃以上でも分解等の問題がない水を作動流体とした。

図2に、水を作動流体とするランキンサイクルの温度-比エントロピー線図を示す。膨張機入口で過熱させる場合とさせない場合のサイクル線図を示した。加熱温度は270℃、冷却温度は90℃とした。ランキンサイクルでは、膨張過程で凝縮によって生じる液滴がタービンを痛めてしまうという問題を回避するため、通常過熱を行う。レシプロ式でも、オイル中に水が混入することで粘性が低下してピストンや軸受けが磨耗してしまうことを防止する目的で過熱が