

論文の内容の要旨

論文題目 自励振動式蒸気エンジンの提案 及びその高性能化に関する研究

氏名 八束 真一

化石燃料の枯渇や地球温暖化の防止などを背景に、エネルギー利用効率向上の重要性が高まっている。運輸部門のCO₂排出量は、日本全体のCO₂排出量の約2割を占めることから、自動車の燃費向上は我が国のCO₂排出量の削減に大きく貢献することができる。一方、排熱を有効利用するための排熱発電システムを乗用車に搭載するためには、動作温度が300℃以下で図示熱効率が高く、かつ軽量で安価でなければならない。従来の排熱発電システムに用いられている蒸気エンジン、スターリングエンジン、熱音響エンジン、熱電変換素子は、動作温度、図示熱効率、重量、価格において、部分的に強みを持つが、要求仕様を全て同時に満足させることが困難である。

そこで、本研究では、外燃機関の長所に着目し、乗用車に搭載するための要求仕様を満足する排熱発電システムの具現化を行った。構成を簡素化して低コスト化や重量低減を実現するためには、熱音響エンジンのように自励振動を生じさせて膨張過程のエネルギーの一部を慣性として蓄え、次の圧縮過程に利用することで圧縮用のピストンをなくすことが有効である。また、ランキンサイクルのように相変化を用い、さらに過熱させず飽和状態から膨張させることで、低温度差でも図示熱効率が10%を超える可能性が高まる。

以上のことから、乗用車に搭載するための要求仕様を満足する排熱発電システムを具現化するための方針として

稼働部を減らすために、自励振動現象を利用すること

相変化を用いて低温度差で動作させ、過熱させず飽和状態から膨張させて図示熱効率を高めること

として掲げた。そして、簡素な構成の自励振動式蒸気発電システムの提案、およびその実現可能性の検証を目的とした研究を行った。

(1) 自励振動式蒸気エンジンの提案と原理の検証

表1に示す3種類の自励振動式蒸気エンジンの機器構成を検討し、熱損失が最も少ないと考えられるストレートタイプ自励振動式蒸気エンジンを選定した。

表1 自励振動式蒸気エンジンの機器構成

	構成	ディスプレイサ (位相調整器) の具現化手段	図示熱効率
水ディスプレイサ タイプ	<p>蒸気アキュムレータ 加熱部 冷却部 ピストン フライホイール ループ管(水ディスプレイサ)</p>	液柱の共振	低 ループ管中の気体側 で生じるヒートパイプ 現象による熱損失が大
ストレートタイプ	<p>蒸気アキュムレータ 加熱部 冷却部 ピストン フライホイール 液体ピストン(作動媒体:水)</p>	伝熱遅れ (気化の遅れ)	高
ループタイプ	<p>冷却部 加熱部 ピストン フライホイール ループ管</p>	伝熱遅れ (浮力による 気泡移動の遅れ)	低 気泡の上昇と共に移動 する加熱された水 による熱損失が大

ストレートタイプ自励振動式蒸気エンジンの原理検証機で、安定的に動作することは確認できたが、図示熱効率は 0.82 %で、過熱のないランキンサイクルの理論効率の 20.1 %と比較して遥かに小さいことがわかった。P-V 線図が 8 の字を描いていることや、加熱部に残った水が気化し続けていることがこの原因であった。そこで、膨張過程での蒸気発生や蒸気アキュムレータの影響を考慮した精度の高い数値解析を用いて、高効率化の指針を導出することとした。

(2) 自励振動式蒸気エンジンの高効率化の指針導出

自励振動式蒸気エンジンの図示仕事や図示熱効率を向上させるために、核沸騰 - 液膜蒸発動作解析モデルで解析を行い、ストレートタイプ自励振動式蒸気エンジンを高効率化の指針を導出した。核沸騰 - 液膜蒸発動作解析モデルとは、液体ピストンの中の核沸騰と気液界面が後退する過程で壁面上に取り残された液膜の蒸発を考慮したモデルである。液体ピストンの中では核沸騰が起こるため、Kutateladze の過熱度と熱流束の関係式から核沸騰による蒸気発生量を求めた。また、液体ピストン先端の気液界面が後退する過程で壁面上に取り残された液膜厚さを Han & Shikazono の式で算出して熱流束を求め、蒸発による蒸気発生量を求めた。液膜からの蒸発を考慮することで図示仕事及び図示熱効率の予測精度が向上することを、円筒型自励振動式蒸気エンジンの実験結果との比較で示した。

本解析を用いて、液膜からの蒸気の発生の遅れが円筒型自励振動式蒸気エンジンの効率が低い大きな要因であることを明らかにした。加熱部の流路を微細化すると液膜の蒸発速

度が上がり，図示熱効率の向上が期待できることを見出し，流路径 0.02 mm では，加熱部温度 270 で図示熱効率が 21 %まで向上すると予測した．さらに本解析を用いて圧縮過程で急激な圧力の上昇を緩和させる蒸気貯めの最適化を行い，蒸気貯めの体積が小さい場合には負の仕事が発生して図示仕事が減少すること，蒸気貯めの体積が大きい場合は圧力が上昇せず図示仕事が小さくなり図示熱効率が低下することを明らかにした．

(3) 自励振動式蒸気エンジンの高効率化の検討

予測に基づき，図 1 に示す流路の相当直径が 0.02 mm の焼結金属タイプ加熱部と相当直径が 0.2 mm の中空タイプ加熱部を製作した．加熱部で微細な流路を構成すると流路の急拡大によって，蒸気と液体ピストンが混合して熱交換による凝縮が生じ，図示熱効率が低下してしまうことが懸念されるため，加熱面を膨張管と直交させる平面型自励振動式蒸気エンジンを提案した 相当直径が細い焼結金属タイプで 加熱部温度 270 冷却部温度 90 の条件で，図示熱効率 12.7 %を確認した．飽和温度-比エントロピー線図から，気化せずに加熱された液相が冷却部に移動して放熱すること，および膨張過程での断熱部での凝縮が，予測と実験との差の主な要因であることを明らかにした．

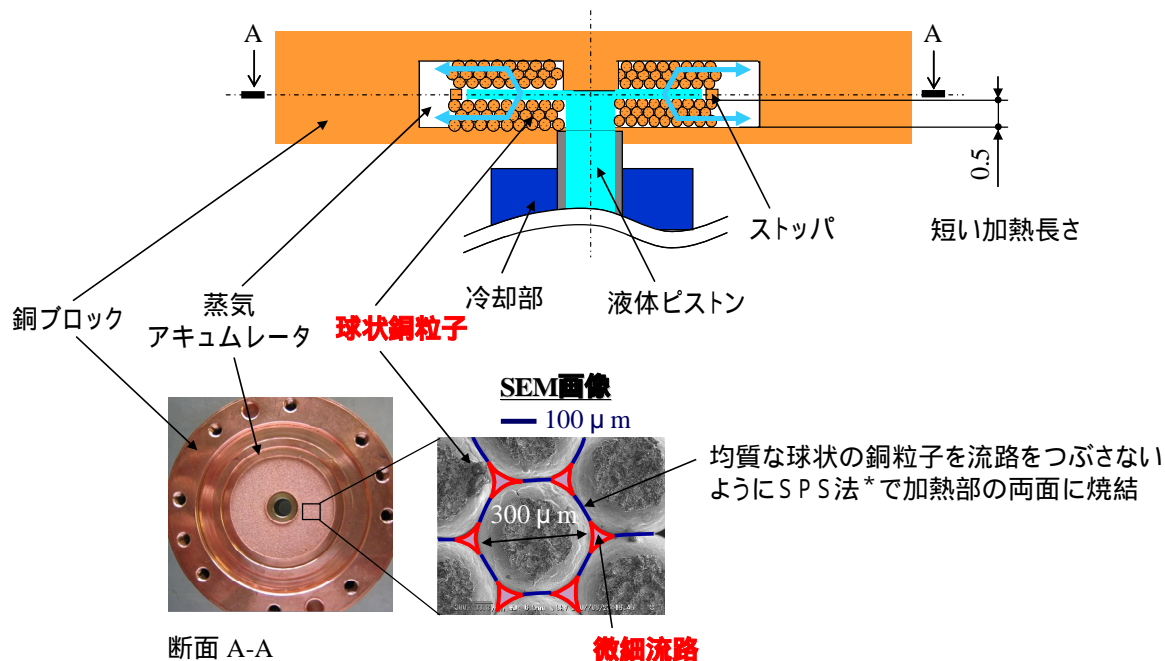


図 1 平面型自励振動式蒸気エンジンの焼結タイプ加熱部の構造

(4) 自励振動式蒸気エンジン加熱部の非定常温度計測

この自励振動式蒸気エンジンのさらなる高効率化のためには，加熱部における伝熱現象を詳細に把握し，設計手法の精度を向上させる必要がある．そのためには，実際の作動中に時々刻々と飽和蒸気圧が変化する中で，核沸騰や液膜の蒸発などの相変化現象を捉えなければならない．そこで，中空タイプの平面型自励振動式蒸気エンジンの加熱表面に，微

細な白金抵抗温度センサを埋め込んで非定常温度計測を行った。1 ms の応答性と 0.1 の温度分解能を確保するため、厚さ 150 nm、幅 20 μm 、長さ 26 mm の白金抵抗線を 1 mm \times 1 mm の領域中に 26 ターンさせ、加熱部壁面上に中心から $r=5, 10, 15$ mm の位置に 3 箇所配置した。本計測結果から、液体ピストンが加熱部に入ると核沸騰が開始し、飽和蒸気圧に近づくと熱流束が減少する様子が観測された。また、核沸騰による熱流束のオーダーは核沸騰 - 液膜蒸発動作解析モデルと実験結果と比較的良好に一致した。液膜の蒸発が液体ピストンが加熱部から出た後もしばらく続く様子が再現されており、液膜の蒸発によって生じる熱流束のオーダーも実験結果と一致した。このことから、液膜の蒸発を考慮する核沸騰 - 液膜蒸発動作解析モデルが有用であることがわかった。一方、より早いタイミングでの圧力上昇や熱流束の振動を予測するためには、液体ピストンに気泡が混入する影響を考慮する必要がある。また、液膜厚さが過小評価されている要因については今後明らかにしていく必要がある。

(5) 車載による燃費改善効果の見積もり

最後に、本自励振動式蒸気エンジンを車載するため、図 2 に示す車両用の排熱発電システムの構成を提示した。平均の発電効率を高くするため間欠運転を検討し、2.4L ガソリンエンジンに 400W 発電出力の自励振動式蒸気エンジンをを用いた場合の効果を見積もった。新欧州走行モードにおいては、加熱部温度を 270 と 300 の間に保持するように動作させると最も発電量が大きく、平均で 134 W 発電できることがわかった。これは走行抵抗の約 2.7% に相当する。アメリカンハイウェイモードでは、加熱部温度を 300 と 330 の間に保持すると最も発電量が大きく、平均で 365 W 発電できることがわかった。これは走行抵抗の約 3% に相当する。発電出力の制約を除いた場合、アメリカンハイウェイモードでは、加熱部温度を (300, 330) に保持すると走行抵抗の 5.4% に相当する 652 W の発電が可能となる。膨張機の軸と内燃機関の出力軸と変速機でつなぎ、発電せずに直接動力として再生させれば、さらに燃費改善効果が期待できる。

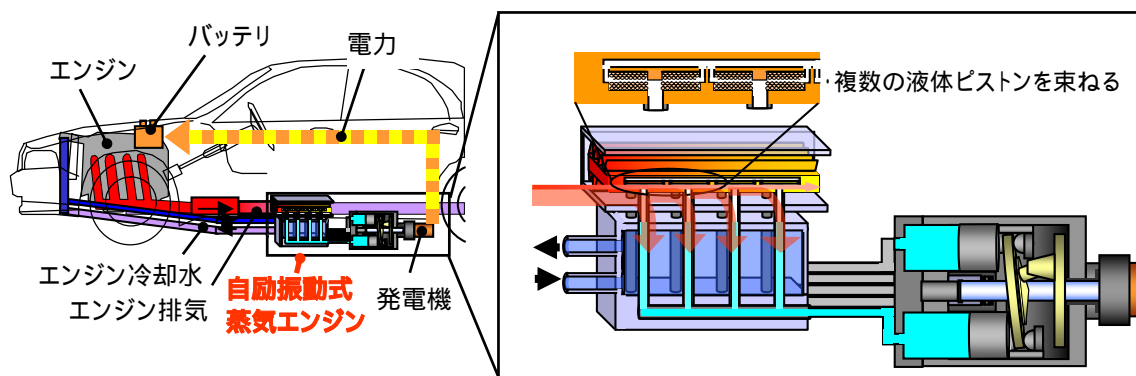


図2 車両用の排熱発電システムの構成