

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06690

研究課題名(和文)自動車用排熱回収システムに用いるフラッシュ蒸気機関の最適化

研究課題名(英文)The Optimization of the Subcooled Liquid, Flash Boiling Cycle Powered Automotive Waste Heat Recovery System

研究代表者

吉山 定見 (Yoshiyama, Sadami)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：80210780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：排熱回収システムとしてフラッシュ蒸発および壁面熱伝達を利用した新しい蒸気機関サイクルを提案した。そこで、フラッシュ蒸気機関を試作し、高温高圧水の噴射温度や壁面温度が機関の熱効率に及ぼす影響を定量的に調査した。また、フラッシュ蒸発過程を可視化し、噴霧角や噴霧先端到達距離を計測できるシステムを構築した。ただし、噴射圧力や噴射温度を一定としても噴射開始とともにノズル先端温度が低下し、その噴霧は非定常な噴霧となることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A new steam engine cycle for which flash evaporation and wall heat transfer are used as an exhaust heat recovery system was proposed. A flash steam engine was made and the influence of the temperature of the pressurized water at elevated temperatures and the wall temperature, on thermal efficiency of an engine was investigated quantitatively. The flash vaporization process was visualized later, and a system where the spray angle and the spray tip penetration can be measured was built. After the start of injection the nozzle temperature was seen to decrease, and it was found that the spray becomes unstable even if the injected water temperature is kept constantly.

研究分野：熱工学，燃烧工学，内燃機関

キーワード：排熱回収 フラッシュ蒸発 省エネルギー 内燃機関 熱効率

1. 研究開始当初の背景

近年、CO₂排出量の低減は先進国・発展途上国を含めた地球規模の課題となってきた。そこで、自動車用動力源としても燃料電池やバッテリー（蓄電池）などを用いる次世代自動車の開発が各国で進められており、今後内燃機関が占める割合は減少していく傾向にあることは確かである。しかしながら、2040年頃までは自動車用動力源の大部分は内燃機関であるという予測もされている。従来型の内燃機関を用いた自動車がすでに全世界へ普及していることから、自動車1台当たりのCO₂排出量を削減していくためには、この内燃機関の熱効率向上は急務とも言える課題である。現在、自動車用ガソリンエンジンの平均的な熱効率は35%程度であり、燃料がもつエネルギーの65%は利用されずに大気中に放出されている。そこで、捨てられる排熱を有効利用するために排熱を熱源とする排熱回収システムが数多く提案されている。これまでもランキンサイクル、スターリングサイクル、熱電素子などのシステムが提案されてきた。しかしながら、エネルギー回収率、装置コストなどの課題も多く、いまだ実用化には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、図1に示すように排熱により高温高压の水を生成し、ピストン型の蒸気機関に噴射装置を用いて間欠的に噴射を行い、動力を取り出す新しい蒸気サイクルの構築を行う。本サイクルをTS線図上に描いたものを図2に示す。フラッシュ蒸発を利用したTLCサイクルにフラッシュ噴霧の壁面熱伝達過程を追加したサイクルとなる。

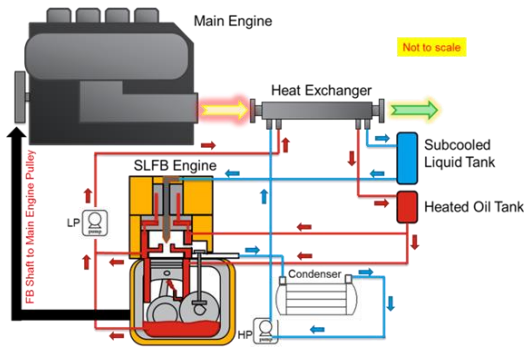


図1 排熱回収システムの概要

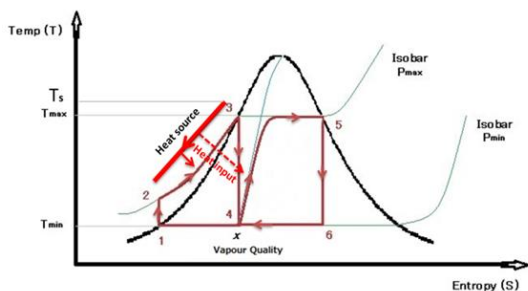


図2 SLFBサイクル

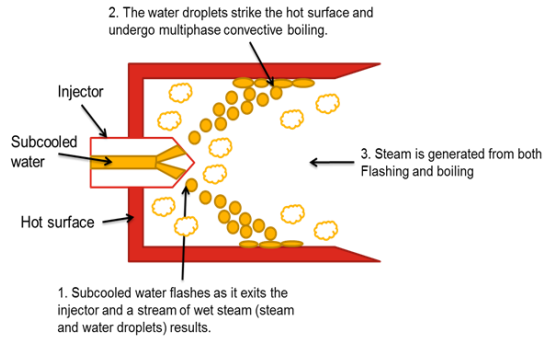


図3 フラッシュ蒸発および壁面蒸発

図3に示すように、このサイクルではフラッシュ蒸発と壁面熱伝達による蒸発の2つの現象を利用した体積変化から動力を取り出す。そこで、このフラッシュ蒸気機関を最適化するために、高温高压の動作流体をシリンダ内へ噴射する際の噴霧特性を明らかにし、噴射条件や壁面条件が機関の熱効率に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、フラッシュ蒸気機関を試作し、噴射条件や壁面条件がフラッシュ蒸気機関の熱効率に及ぼす影響を調査した。さらにシリンダ内のフラッシュ蒸発および壁面蒸発現象を可視化し、その噴霧特性の計測を試みた。

(1) フラッシュ蒸気機関の熱効率に関する検討

フラッシュ蒸気機関の熱効率を測定するため、排熱の代わりに電気ヒーターや高压ガスを用いて高温高压水を作成し、機関を電気モーターにより駆動させ、ブレーキと併用させ、一定回転数で運転させた。実験装置の概略を図4-1に示す。

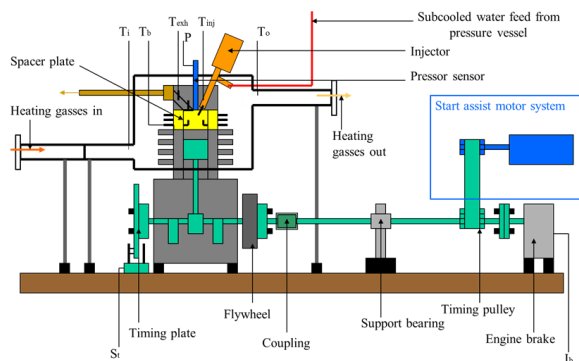


図4-1 実験装置の概略

さらに、フラッシュ蒸気機関の熱効率に及ぼす諸因子の影響を調査するため、図4-2に示すような試験用機関を製作した。本来、図1に示すようにフラッシュ蒸発と壁面熱伝達は1つのシリンダ内で発生させ、仕事を取り出す機関であるが、図1に示すような機関を試作した際に噴射条件となる高温水の温度

と壁面伝達を行うシリンダブロック温度を独立して変化させることができなかったため、本研究では、噴射温度と壁面温度をそれぞれ変化させることができる図4-2のような機関を用いてそれぞれのパラメータが機関の熱効率に及ぼす影響を調査した。図中のブロック温度はピストン膨張行程で熱損失が発生しないように加熱した。したがって、熱効率は、高温高圧水のもつエネルギー、シリンダ壁面から供給される熱量およびブロックから供給される熱量の総和を供給熱量として、シリンダ内圧力から求めた1サイクルの図示仕事から算出した。

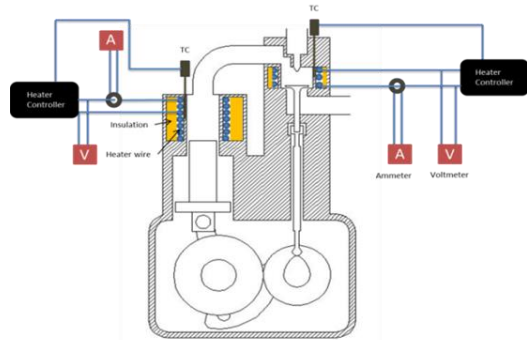


図 4-2 試作したフラッシュ蒸気機関

(2) フラッシュ蒸発過程の可視化

図5にフラッシュ蒸発過程の可視化に用いた実験装置の概略を示す。圧力容器に水を充填し、窒素ポンベにより噴射圧力を6~8 MPaの範囲で、電気ヒーターを用いて圧力容器内の高圧水およびノズル系を150~180℃まで加熱し、噴射水の温度を設定した。電子制御弁に任意の噴射信号を送ることで噴射期間の制御を行った。なお、雰囲気条件としては大気圧、室温条件とし、自由噴霧の挙動を、高速度ビデオカメラを用いて撮影した。インジェクターには機械式のものをを用い、ノズルは単孔ノズル、ノズル噴孔径は1mmとした。撮影画像から噴霧先端到達距離や噴霧角などの噴霧特性を測定することを試みた。

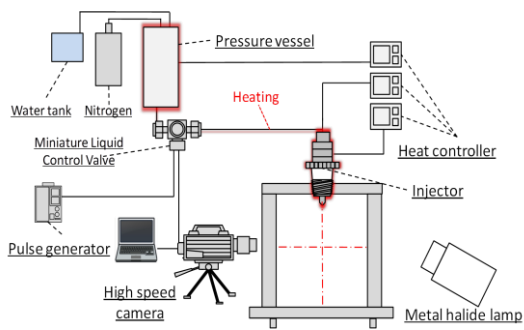


図 5 フラッシュ蒸発過程の可視化

(3) 排熱回収率

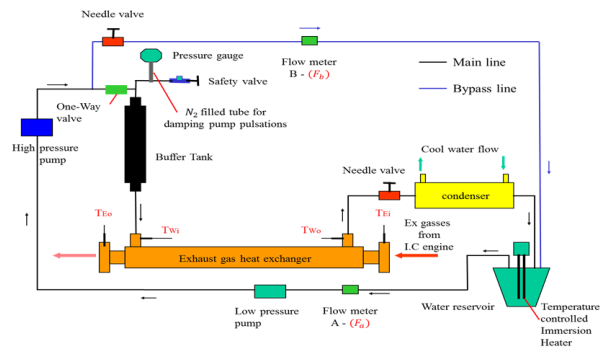


図 6 熱交換器による排熱回収率の試験

サイクル効率を検討する際には、排熱の回収率がサイクルの熱効率に大きく影響する。そこで、図6に示すように4気筒量産ガソリンエンジンの排ガスを熱交換器に導入し、高圧水を流し、その熱回収率を測定した。

4. 研究成果

(1) フラッシュ蒸気機関の熱効率に及ぼす噴射温度および壁面温度の影響

図7にフラッシュ蒸気機関の熱効率の測定結果を示す。噴射圧力 8MPa 一定として、噴射温度を200~250℃の範囲で変化させ、さらに壁面温度を200~300℃の範囲で変化させた場合の結果である。いずれの噴射温度においても壁面温度が増加すると熱効率は増加することがわかる。しかしながら、壁面温度が250℃から300℃増加しても熱効率の増加割合は小さいことがわかる。噴射温度200℃の場合に比べて噴射温度225℃では熱効率の向上が見られたが、噴射温度225℃から250℃の変化では熱効率の向上はわずかである。これらの結果から、噴射温度や壁面温度には最適な温度が存在しており、フラッシュ蒸発過程や壁面衝突するフラッシュ噴霧の挙動が壁面熱伝達の増加に寄与していると考えている。フラッシュ蒸発することで微粒化させた噴霧液滴(飽和水)が高温壁面に衝突し、壁面からの熱伝達が促進されると考えられるので、このような噴霧挙動を測定し、その噴霧特性と熱伝達特性との関係を明らかにする必要があることがわかった。

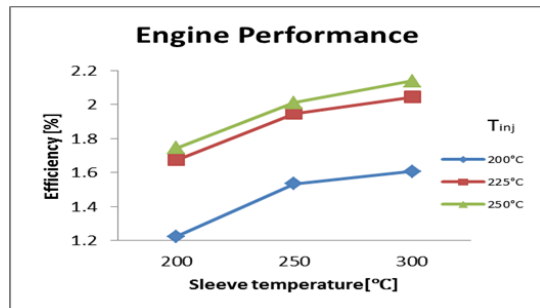


図 7 熱効率に及ぼす噴射温度および壁面温度の影響

図 4-1 および図 7 に示したフラッシュ蒸気機関は熱効率を算出するため 1 サイクルのみの運転を行った。本機関を定常運転し、サイクル平均した熱効率、図示平均有効圧などの出力性能を得るため、図 8 に示すような高温オイルの循環装置による壁面加熱システムを試作した。

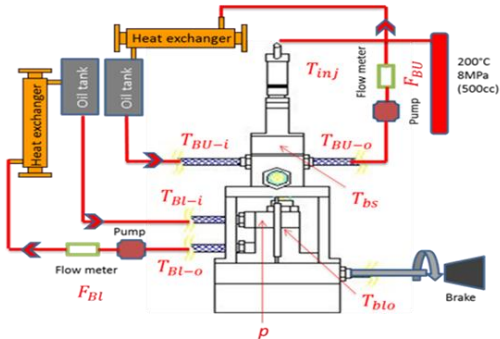


図 8 連続運転を行うための壁面加熱システム

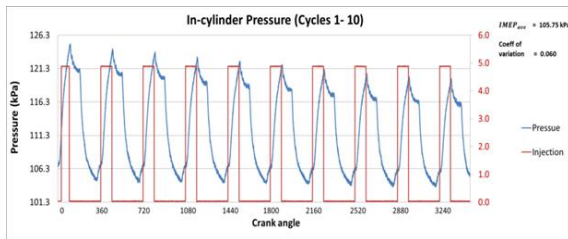


図 9-1 始動後 10 サイクル目までのシリンダ内圧力履歴

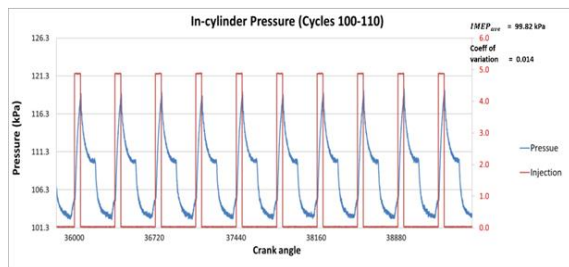


図 9-2 定常運転時のシリンダ内圧力履歴

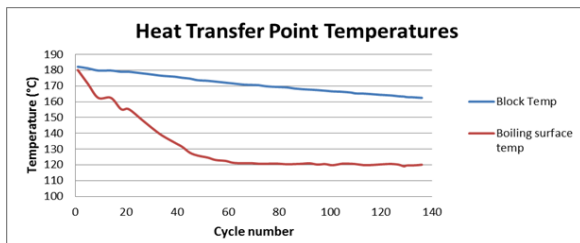


図 9-3 壁面温度およびブロック温度の履歴

高温高压水噴射開始後の 10 サイクル分のシリンダ内の圧力履歴を図 9-1 に示す。シリンダ内の最高圧力が徐々に低下していくことがわかる。さらに、定常運転となった条件におけるシリンダ内圧力の履歴を図 9-2 に示

す。サイクル毎の圧力変動は小さく安定しているが、最高圧力が 120kPa 程度と小さく、出力は低下している。このときの壁面温度およびブロック温度を測定した結果を図 9-3 に示す。ブロック温度の低下に比べて、壁面温度の低下が速く、定常運転に到達した条件においては、壁面温度は 120°C とほぼ一定となっており、フラッシュ蒸発後の飽和水温度が 100°C~105°C 程度であると考え、壁面からの熱伝達はかなり小さくなっていると考えられる。噴射開始直後、フラッシュ蒸発した噴霧が壁面に衝突し、壁面からの熱伝達が促進され、壁面温度が急激に低下するが、壁面を加熱する高温オイルの熱伝導およびオイルから壁面への熱伝達が遅く、壁面温度を一定に保つことができなかったことに起因している。高温の壁面温度を維持しながら、連続運転を行うための壁面加熱方法を今後、検討しなければならないことが判明した。高温オイルの循環方式ではなく、燃焼ガスを用いる方法や壁面形状など再検討することを考えている。

(2) フラッシュ蒸発過程の可視化

図 10 に噴射圧力および噴射温度を変化させた場合の撮影された噴霧画像の時間経過を示す。噴射温度 170°C および 180°C の 2 通り、噴射圧力 6、7、8MPa の 3 通りで噴射華氏から 20ms の間の画像である。いずれも大気圧、室温の雰囲気中に噴射しているため、フラッシュ蒸発が生じていると考えられる。このような噴霧画像から噴霧先端到達距離や噴霧角の算出を行ったが、時間の経過とともに噴霧角が急激に小さくなることがわかった。そこで、ノズル先端に小型の熱電対を取り付け、温度を測定すると、ノズル温度が急激に減少していることが判明した。噴射温度を一定として、フラッシュ蒸発時の噴霧特性を測定することを目的として実験を行ったが、噴射期間中に噴射温度が低下するため、噴射温度と噴霧角および噴霧先端到達距離との関係を求めることはできなかった。現在、高温高压水が噴射期間中にノズル先端を通過する際に高压管などの温度が低下しないように加熱する方法を検討している。また、フラッシュ蒸発することによってノズル先端部あるいはノズル内部において温度差が発生し、ノズル壁面温度が低下するとすれば、フラッシュ蒸気機関においても同様の現象が起きていると考えられる。フラッシュ蒸発を維持するためには、ノズル近傍の温度を精度よく測定し、ノズル先端温度と噴霧挙動との関係を詳細に調べる必要があることがわかった。これらの課題を検討するため、新たな実験装置、計測法の検討を現在、行っている。また、20ms 近い噴射を行うとこのようなノズル冷却が発生すると考えると、噴射期間を多段噴射にすることで、ノズル冷却を抑えながら、必要な量の噴射を行う方法も検討する必要がある。なお、自由噴霧の計測にお

いて数多くの課題が判明したため、当初の計画で実施予定であった、衝突噴霧の挙動、熱流束測定は実施できていない。しかしながら、文献調査を行い、局所熱流束の研究が内燃機関の壁面熱伝達の測定などで実施されたおり、これらの技術を活用することでフラッシュ噴霧の壁面衝突の挙動と壁面熱伝達との関係を調査していきたいと考えている。

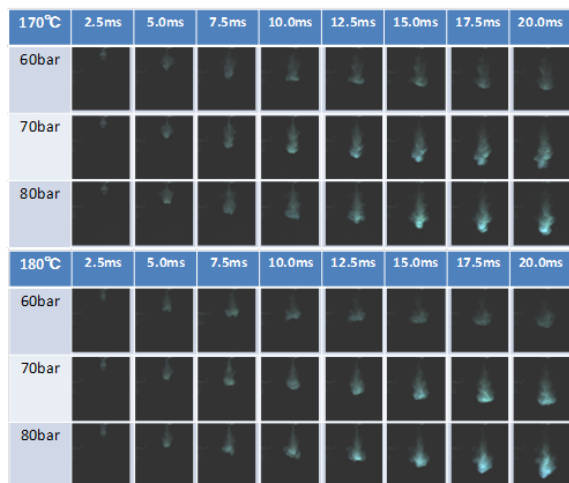


図 10 フラッシュ蒸発時の噴霧挙動

(3) 排熱回収率

熱回収率に及ぼす排気温度の影響を図 11 に示す。図中の数字はエンジン回転数を示している。回転数が増加すると、排気温度が増加し、排気流速も増加するため、熱回収率は減少している。

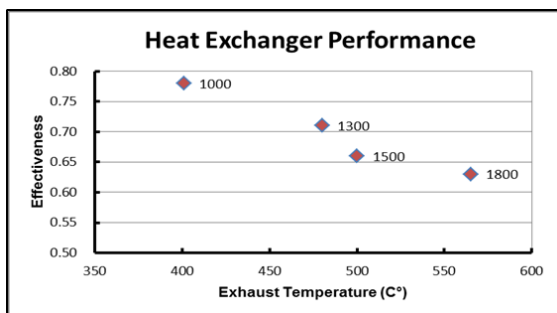


図 11 排気温度が熱回収率に及ぼす影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

① Hewavitarane, D., Yoshiyama, S., A Summary of Findings of the Subcooled Liquid Flash Boiling Cycle and its Applications to Automotive Waste Heat Recovery, The Ninth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2017), 査読有, pp. 1-10, (2017). <https://doi.org/10.1299/jmsesdm..2017.9.C2.03>.

② Hewavitarane, D., Yoshiyama, S., Performance Analysis of a Subcooled Liquid Flash Boiling Cycle Powered Piston Engine for Automotive Waste Heat Recovery, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 査読無, No. 105-16, pp. 181-188, (2016). <http://www.bookpark.ne.jp/cm/jsae/select.asp?pageno=11&pagenum=10&category=103&lang=E&table=JSAP>.

③ Hewavitarane, D., Yoshiyama, S., The Fundamentals Governing the Operation and Efficiency of a Superheated Liquid Flash Boiling (S.L.F.B) Cycled Powered Reciprocating Engine for Automotive Waste Heat Recovery, SAE Technical Paper 2015-10-1966, 査読有, pp. 1-10, (2015). <https://doi.org/10.4271/2015-01-1966>.

〔学会発表〕(計 5 件)

① 芥川醇也, ヘワビタラネ ダミンダ, 吉山定見, 自動車用排熱回収に用いるフラッシュ蒸気機関の熱効率に関する研究, 日本機械学会九州支部第 49 回学生員卒業研究発表講演会, 2018 年 3 月 2 日, 大分大学 (大分県).

② Hewavitarane, D., Yoshiyama, S., The Subcooled Liquid Flash Boiling Cycle, Theory and Application, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, TFEC9, October 30, 2017, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan.

③ 菊地卓也, ヘワビタラネ ダミンダ, 吉山定見, フラッシュ蒸気機関に用いる高温高圧水の噴霧特性計測, 日本機械学会エンジンシステム部門西日本エンジンシステム研究会, 2017 年 9 月 27 日, 岡山県青少年教育センター閑谷学校 (岡山県).

④ 丸山将平, 神宮一馬, ヘワビタラネ ダミンダ, 吉山定見, 自動車用排熱回収システムのためのフラッシュ蒸気機関の最適化, 自動車技術会九州支部学生自動車研究会総会講演会, 2015 年 10 月 16 日, グリーンピア八女 (福岡県).

⑤ 神宮一馬, ヘワビタラネ ダミンダ, 吉山定見, 自動車用排熱回収システムのためのフラッシュ蒸気機関の最適化, 日本機械学会エンジンシステム研究会, 2015 年 9 月 13 日, 山口県由宇青少年自然の家 (山口県).

〔その他〕

① ヘワビタラネ ダミンダ, 吉山定見, 新しい自動車排熱システム, 大学合同新技術説明会・技術相談会 (IPCC 事業), 2016 年 11 月 9 日, 北九州イノベーションギャラリー (福岡県).

② 吉山定見, ヘワビタラネ ダミンダ, 切江裕貴, 菊地卓也, 新しい自動車排熱システム, 北九州学研都市 産学連携フェア, 2016

年 10 月 20 日～21 日，北九州学研都市体育館（福岡県）。

③吉山定見，ヘワビタラネ ダミンダ，新しい自動車排熱回収システム，イノベーションジャパン 2016 大学見本市（JST 主催），2016 年 8 月 25 日～26 日，東京ビックサイト（東京都）。

④ヘワビタラネ ダミンダ，吉山定見，自動車用排熱回収システムに用いるフラッシュ蒸気機関と燃焼検出用イオンセンサの研究開発，自動車技術会 2015 年秋季大会産学連携ポスターセッション，2015 年 10 月 14 日～16 日，西日本総合展示場（福岡県）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉山 定見 (YOSHIYAMA SADAMI)
北九州市立大学・国際環境工学部・教授
研究者番号： 80210780

(2) 研究協力者

ヘワビタラネ ダミンダ
(HEWAVITARANE DHAMINDA)
北九州市立大学・国際環境工学部・研究員