
クレムソン大学（アメリカ） 研修報告書 （研修テーマ）

工学研究科 機械システム工学専攻 渡部 智弘

1. はじめに

2017年8月21日から同年9月15日の間、アメリカのクレムソン大学 CU-ICAR (Clemson University - International Center for Automotive Research) において研究を行った。その報告を以下にする。

2. 共同研究課題の決定

私の所属する流体力学研究室では、自動車の火花点火機関における燃料噴霧特性に関する研究を行っている。その中で、燃料噴霧がエンジン筒内の壁面に付着することを模擬した噴霧の壁面衝突特性に関する基礎研究に取り組んでいる。一方、派遣先のクレムソン大学は国際自動車研究機関(CU-ICAR)を有し、内燃機関をはじめ、自動車に関する先進的な研究が盛んであり、燃料噴霧衝突の影響を、単気筒エンジンを用いた実機に近い実験的な研究が行われている。そこで、筒内直噴式内燃機関における燃料壁面衝突・付着が排気に及ぼす影響を調査すべく、共同研究の課題が決定した。

3. 共同研究スケジュール

8月19日 出国
8月21日 - 9月15日 研究, 中間報告会, 最終報告会
9月18日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名 : Clemson University International Center for Automotive Research
所在地 : 4 Research Drive, Greenville, SC 29607-5257
指導教員 : Dr. Zoran Filipi

5. 共同研究内容

(HCCI 単気筒エンジンを用いた、燃料壁面衝突とピストン表面粗さが排気に及ぼす影響)

5. 1 研究背景と目的

HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) は、予混合圧縮自己着火燃焼のことを指し、予混合で均一な燃料と空気の混合気を形成し、圧縮による温度上昇を利用して自着火させ、燃焼・膨張行程に入るエンジンのことを指す。燃焼温度が低く、空間的に燃料の濃い領域がなく、均一であるため NO_x 、煤の排出が少なく、熱損失も小さい。世界中のエンジン技術者が研究・開発に注力するホットな技術分野である。そこで、ピストン表面に熱伝導率の小さい遮熱コーティングを施すことにより熱損失をさらに低減させることを目的とした研究が進められている。このコーティングは HCCI エンジンのみならず、従来のガソリンエンジン・ディーゼルエンジンへの応用も期待されている。HCCI エンジンにおいては、低負荷運転領域における失火対策にも期待できる。しかし、コーティングを施した場合、その表面の粗さと多孔性が従来のアルミ合金ピストン表面と比較して大きくなり、直噴式内燃機関においては燃料噴霧のピストン表面への衝突が避けられず、これが未燃排気 (CO・HC) 及び煤の排出を増加させてしまう。粗さの大きい壁面に衝突した燃料は、雰囲気との混合に寄与せず付着しやすい傾向にあるためである。遮熱コーティングをピストン表面へ応用するためには、燃料噴霧のピストン壁面衝突が機関性能に及ぼす影響を把握することは必要不可欠である。そこで本研究では、表面粗さの異なるアルミ合金ピストンを用いてエンジン試験を行い、表面粗さが機関性能に及ぼす影響を調査した。

5. 2 実験装置及び条件

本研究で使用したエンジンの概要図を Fig.1 に示す。機関は 550cc 単気筒ガソリンエンジンであり、研究用エンジンとしてポート噴射式及び筒内直接噴射式の両方で運転可能であるが、本研究では直噴式システムにおいて実験を行った。窒素加圧された燃料はアキュムレータに蓄えられ、直噴式インジェクターへ輸送される。外部 EGR ラインは使用せず、吸気行程中の排気バルブの再リフト機構によって排気を再度筒内へ逆流させる内部 EGR によって低酸素濃度化及び高温化し、HCCI 燃焼に必要な熱エネルギーを確保する。DMS は、排気中の煤粒径分布を測定する装置であり、本報告書においては、この煤の排出について報告する。

実験条件を Table 1 に示す。ピストン表面粗さが排気に及ぼす影響を調査するため、粗さの異なるアルミ合金ピストンを実験に用いた。Smooth ピストンの粗さは、今日のガソリンエンジンに使用されるピストンの標準的な粗さである。Rough ピストンの粗さは、およそ遮熱コーティングを施した際に生まれる粗さに等しい。噴射時期を吸気行程初期から中期まで変化させ、インジェクターからピストン壁面の距離を変化させた。本機関はガソリンエンジンであるが、HCCI 燃焼のため点火プラグを用いない。

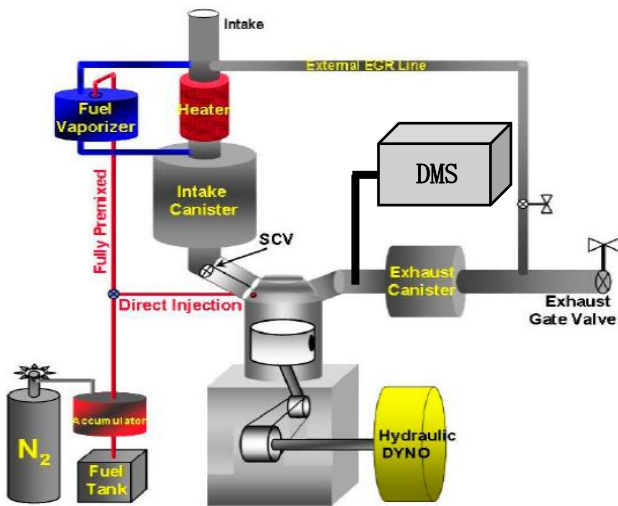


Table 1 Experimental Conditions

Injection Timing(deg.CA before TDC firing)	360,355,350,340,333,320,310,290,270
Engine Speed(rpm)	2000
Piston roughness(μm)	Smooth : 0.25-0.5 Rough : 12
Intake Pressure(kPa)	105.2
Exhaust Pressure(kPa)	109.3
Intake Temperature($^{\circ}\text{C}$)	88.5
Fuel Pressure(MPa)	10
Fuel Mass(mg/cycle)	11
Lambda	1.4

Fig.1 Schematic of Engine setup**

<※Reference>

Powell, T., Hoffman, M., Killingsworth, N., O'Donnell, R., Prucka, R., and Filipi, Z. (2015) "Predicting the Gas-Wall Boundary Conditions in a Thermal Barrier Coated Low Temperature Combustion Engine using Sub-Coating Temperature Measurements," Int. J. Powertrains – Accepted: currently undergoing editing for final publication

5. 3 実験結果及び考察

Fig.2 に粒度分布計 DMS で測定した Smooth ピストン及び Rough ピストンにおける粒子数濃度を示す。煤粒子分布は普通、核生成モードと蓄積モードの 2 つのモードに分類され、2 つのピークを持つ。核生成モードは単体の煤粒子を意味し、蓄積モードは Fig.3 に示すような複数の粒子が凝集と凝固を繰り返すことで形成される比較的径の大きい粒子の塊のことを指す。本研究においても Fig.1 の結果のように両モードを確認することができた。Smooth ピストンでは核生成モードの排出が、Rough ピストンでは蓄積モードの排出が大きくなることが明らかとなった。Rough ピストンでは表面粗さが大きいため燃料が衝突した際に付着が起こりやすく、空気との混合が抑制されリッチな領域が大きくなり蒸発が抑制されてしまうことで、凝集・凝固が進んだためである。結果的に、核生成モードであったものが、衝突粗さの影響でその大部分が蓄積モードへシフトする結果となった。

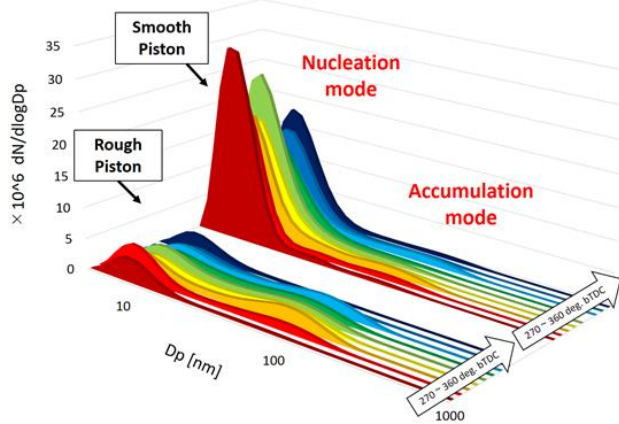


Fig.2 Soot distribution

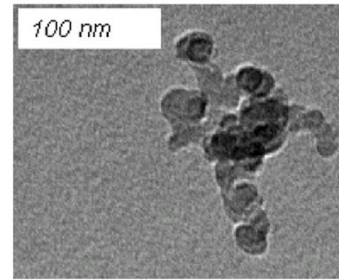


Fig.3 Accumulation mode

次に、質量ベースでの評価を行った。煤の粒径と質量には、以下の式(1)のような関係がある。

$$\text{Mass } (\mu\text{g}) = 5.20 \times 10^{-16} \cdot D_p^3 \text{ (nm)} \quad (1)$$

式(1)を用いて、両モードの合計の質量を算出し、さらに噴射量で標準化した値で評価を行った。以下の Fig.4 にその結果を示す。上死点付近における噴射を除いて、各噴射時期において排出される煤の質量が Rough ピストンにおいて 2~4 倍程増加することが明らかとなった。ピストン表面粗さの増加が燃料の壁面付着を引き起こすことで蓄積モードが増加し、質量ベースで考えると煤の質量は粒径の 3 乗に比例することから、蓄積モードの増加が煤全体の質量の増加に大きく影響している。さらに、両ピストンにおいて結果が類似する傾向を示すことから、煤の排出は噴射時期に依存することが明らかとなった。しかし本研究においては、この類似するグラフの傾向の原因の解明には至らなかった。

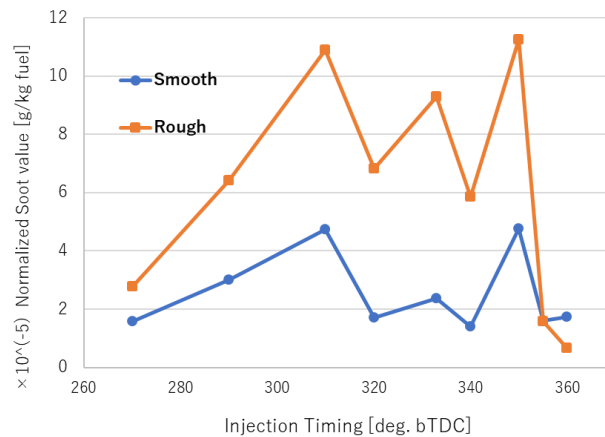


Fig.4 Normalized Soot value

5. 4 結論

単気筒直噴ガソリンエンジンを用いて、ピストン表面粗さが排気に及ぼす影響を調査した。表面粗さの増加により、蓄積モードの煤粒子が増加し結果的に排出される煤の質量が増加する傾向があることが分かった。しかし本研究では、Fig.4 のグラフのようなある特定の傾向を示す原因及び上死点付近噴射においては両ピストンにおいて差が小さくなることの原因の解明には至らなかった。これらは筒内のガス流動、温度、圧力、衝突距離（インジェクターとピストン表面の距離）、壁面温度等の因子が影響していると考えられ、可視化エンジンを用いた PIV 法や LIF 法

等によるさらなる調査が必要である。さらに、我々が広島大学で取り組んでいる定容容器内での噴霧の可視化による現象の解明も求められる。

6. まとめ

海外共同研究プログラムに参加し、約1か月アメリカで研究生活を経験することで、勉学面のみならず生活面で大変貴重な体験を得ることができた。私は、所属する流体力学研究室でガソリンエンジンの燃料噴霧挙動に関する研究を行っているが、この派遣期間中にガソリン HCCI エンジンに関する実験やデータ解析を通じて大変多くの関連のあることを学ぶことができた。また、約1か月間、日本語が全く通じないところで生活をするなかで英語によるコミュニケーションが少しではあるが上達したと実感している。あまり英語が得意ではなく、初めの1週間程はなかなかネイティブの方の話す英語を理解することもできず、また自分の言いたいことも伝えられない日々が続いた。しかし徐々に耳も慣れ、また少々文法が違っていても通じることを知り、とにかく話してみることを続けていると自然と会話が弾むようになった。帰国後に受験した TOEIC では、渡航前から 100 点以上点数が伸び、この海外共同研究を通じて英語における自信が付いたことを確信している。渡航前は考えたことすらなかったが、今回の海外での経験を通じて、将来海外で仕事をすることに興味が出てきた。将来、海外でも活躍できるエンジニアとなるため、今後も英語の学習を継続していきたいと感じた。

7. 謝辞

今年度、海外共同研究プログラムに参加する機会を与えて頂きました、流体力学研究室の西田恵哉教授、尾形陽一准教授に深く御礼申し上げます。本共同研究において、ご指導いただいたクレムソン大学の Zoran Filipi 教授、Mark A Hoffman 教授、チューター学生の Ryan O'Donell 氏、Tommy Powell 氏に厚く御礼申し上げます。また、研修中、グリーンビルの観光や食事に連れて行ってくださった CU-ICAR の研究室の学生に感謝致します。最後に、海外共同研究プログラムをサポートして頂いた実行委員会の先生方、学生支援グループ国際事業担当の皆様感謝致します。
