

論文・解説

21

直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減の研究

A Study on Cold Emission Reduction of
Direct-Injection Gasoline Engine堀 隼基^{*1}

Junki Hori

萩野 雄介^{*2}

Yusuke Hagino

瀬戸 祐利^{*3}

Masatoshi Seto

藤川 竜也^{*4}

Tatsuya Fujikawa

山川 正尚^{*5}

Masahisa Yamakawa

要約

環境負荷低減の観点から、内燃機関において、冷間エミッション（EM）の低減は重要な課題である。本研究では、直噴ガソリンエンジンを対象に、筒内状態量の制御による冷間 EM 低減技術の研究を行った。この結果、冷間での燃料蒸発を促進し、未燃炭化水素（Total Hydrocarbon: THC）と排出微粒子数（Particle Number: PN）を大幅に低減できることが分かった。具体的には、可変動弁システムを用いた吸気バルブ開時期の遅角化（Late Intake Valve Opening: LIVO）により、吸入空気のエネルギーを有効活用することで状態量を制御することや、エミッション低減につながるメカニズムを、高速ガス計測や可視化計測を用いて確認した。

Abstract

Reducing cold emissions (EM) in internal combustion engines is an important issue to alleviate an environmental impact. In this study, we developed a technology to reduce cold EM by controlling the in-cylinder state using a variable valve system in a direct injection gasoline engine. As a result, we promoted fuel evaporation in cold conditions and reduced unburned hydrocarbons (Total Hydrocarbon: THC) and particulate number emissions (Particle Number: PN) significantly. Specifically, this was achieved by effectively utilizing the energy of the intake air through Late Intake Valve Opening (LIVO). Additionally, we elucidated the reduction mechanism using high-speed gas measurements and visualization techniques.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Measurement, Emissions gas, Fuel spray

1. はじめに

環境負荷低減の観点から、自動車から排出される汚染物質の低減が強く求められている。特に、直噴ガソリンエンジンの冷間時においては、燃料の気化が不十分であるため、筒内に噴射された燃料の一部がシリンダーライナー壁面やピストン頂面に付着することで THC や PN を排出している⁽¹⁾⁽²⁾。更に、排気浄化触媒が活性化されていない始動時には、エンジンから出るガスのほとんどが浄化されることなく排気管から排出されている⁽³⁾。したがってゼロエミッション実現に向け、冷間 EM の低減は重要な課題の 1 つである。そこで本研究では、直噴ガソリンエンジンの可変動弁機構を用いて、筒内ガスの温度、圧力などの状態量を制御することで液体燃料の蒸発を促進し、THC と PN を大幅に低減することとそのメカニ

ズム解明を目的とした。

2. 筒内状態量制御を用いた冷間 EM 低減技術

本研究で検討した冷間 EM 低減技術の概要を Fig. 1 に示す。燃料の代表としてイソオクタン飽和蒸気圧曲線、冷間及び温間時における筒内 P-T 線図、並びに吸気行程での燃料噴射開始時期（Start of Injection: SOI）の一例を示す。冷間時は、吸気行程から圧縮行程初期にかけて筒内ガス温度は燃料の飽和温度を下回り、温間時に比べ著しく蒸発が悪化する。そこで、温間相当の蒸発特性を得るために、①筒内圧力を下げて相対的に燃料の飽和温度を低下させる、②筒内温度を上げて相対的に燃料の飽和蒸気圧を高める、という 2 つの手法を検討した。具体的には、LIVO により筒内に大きな負圧場を形成することや、排気バルブ閉時期を吸気バルブ開時期と上死点を挟

*1~4 パワートレイン開発本部
Powertrain Development Div.

*5 技術研究所
Technical Research Center

んで対称に進角する (symmetry Negative Valve Overlap: sNVO) ことで内部 EGR を残留させて制御できる。

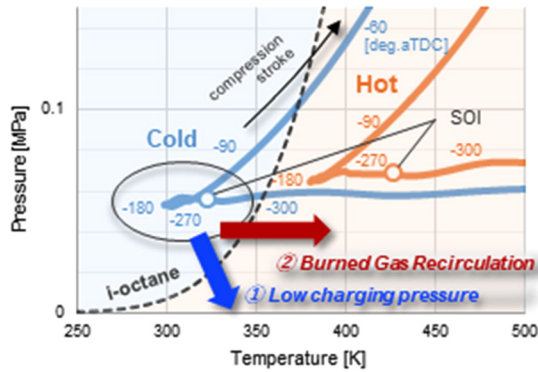


Fig. 1 Overview of Approach to Cold Emission Reduction

3. エンジン実験による検証

3.1 実験条件

筒内状態量制御による冷間 EM 低減のポテンシャルについて、単気筒エンジンを用いて検証を行った。供試エンジン仕様を Table 1 に示す。燃焼室には、中央にインジェクタを配置し、点火プラグを 2 本備える⁽⁴⁾。動弁系は、バルブリフトカーブを任意に設定可能な油圧駆動の可変動弁機構を用いた。評価条件は、Table 2 に示す環境温度 25°C スタートのモードにおいて加速走行を行う際の代表条件を対象とし、油温及び冷却水温 (Tw) は 35°C に設定した。燃料噴射は吸気行程一括とし、SOI は各条件で THC, PN が最良となる時期を選定した。PN の測定には微粒子数濃度分析計 EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer, TSI 社製 model 3090) を用い、計測可能な粒径 5.6~560nm の粒子の粒子数や粒径分布を測定した。

Table 1 Engine Specifications

Engine type	4 stroke, 4 valves
Cylinder number	Single
Displacement [cc]	499
Bore×Stroke [mm]	83.5×91.2
Compression ratio	17.05
Fuel system	Direct Injection
Fuel type	Gasoline (RON96)
Valve train system	Fully variable (hydraulic)

Table 2 Cold Acceleration Conditions

Engine speed [rpm]	1500
Net IMEP [kPa]	400
Lambda	1.0
SOI	Minimum THC, PN
Ignition timing	MBT or Knock limit
Oil/coolant temp. [°C]	35

3.2 実験結果

Fig. 2 に、実験で使用した LIVO 及び sNVO のバルブリフトカーブと、この時の P-V 線図を示す。LIVO では、吸気バルブ開時期の遅角化に伴い、筒内に大きな負圧場が形成される。吸排気シムメトリに設定した sNVO では、排気バルブ閉時期の進角化に伴い、筒内に残留ガスを閉じ込めながら排気行程で再圧縮されることが特徴である。Fig. 3 に、LIVO 及び sNVO の THC, PN, 燃料消費率 (Net-ISFC), 燃焼変動率 (COV of IMEP) 及び排ガス温度の結果を示す。なお、Base バルブタイミングでの温間 (Tw=90°C) の結果もあわせて示した。それぞれ IVO 時期の遅角化及び sNVO 期間の拡大に伴って THC, PN が低減し、温間レベルまで改善できるポテンシャルをもつことが分かった。また、吸気行程で負圧をつくる LIVO ではポンプ損失の悪化が懸念されたが、燃焼改善によって燃料消費率は Base 条件と同等または改善される結果が得られ、燃費の面でも利点があることが分かった。ただし、内部 EGR を導入する sNVO では、燃焼安定性の悪化と排ガス温度の低下を伴い、冷間始動初期に重要となる触媒の早期活性や燃焼安定性の観点では LIVO がより優れていると考えられる。

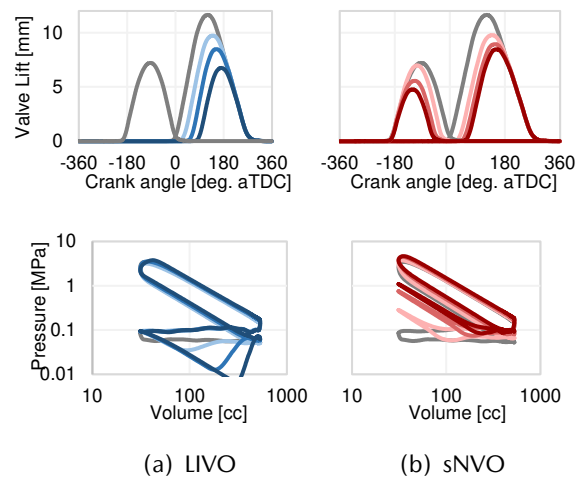


Fig. 2 Valve Lift Curve and P-V Diagram of LIVO and sNVO

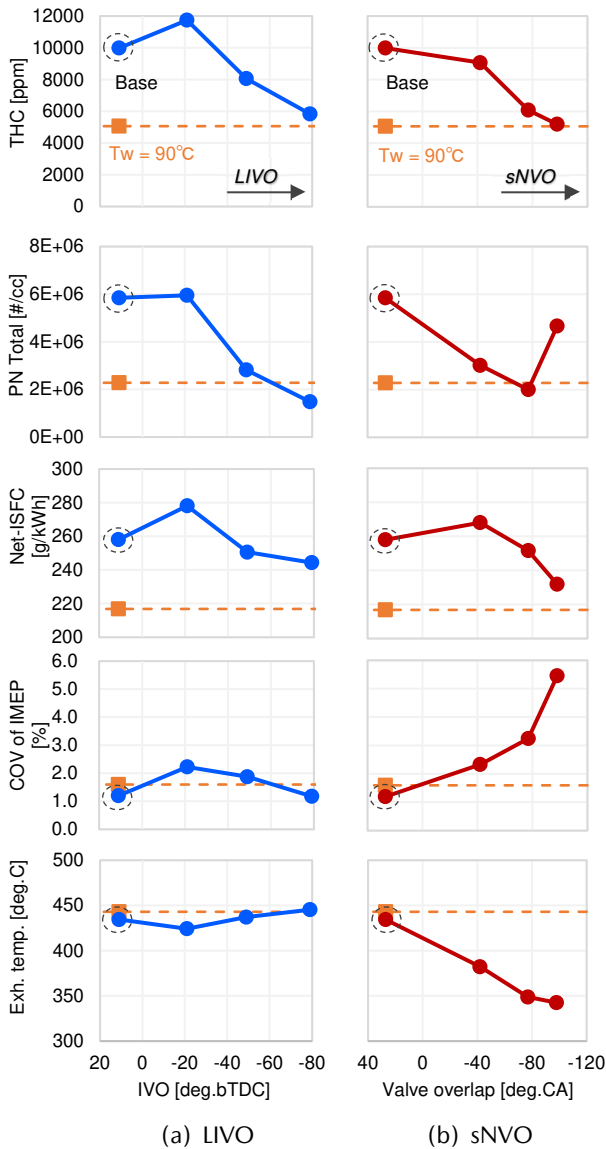


Fig. 3 THC, PN, Net-ISFC, COV of IMEP, and Exhaust Gas Temperature Results of LIVO and sNVO

3.3 筒内状態量解析

筒内状態量の変化を定量的に分析するため、1次元のサイクルシミュレーションソフト GT-POWER (Gamma Technologies, LLC) の Three Pressure Analysis (TPA) を用いて、筒内ガス温度や内部 EGR 率を推定した。TPA は、吸排気ポートの圧力履歴と筒内の圧力履歴の 3 つの計測値から吸排気行程時のガス交換と筒内の熱発生率を同定し、各行程における温度、ガス組成等の状態量を求める手法である。TPA によって得られた吸気バルブ開時期 (IVC) における筒内ガス温度 (T_{ivc}) のコンターマップを Fig. 4 に示す。図中のプロットは Fig. 3 で示した計測点を指す。LIVO, sNVO はともにバルブタイミング操作に応じて筒内ガス温度が高くなっている。ここで、sNVO では内部 EGR の導入によるものであるが、LIVO では負圧場に流入する吸気流の運動エネルギーが筒内で熱に変わった結果であると考えられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

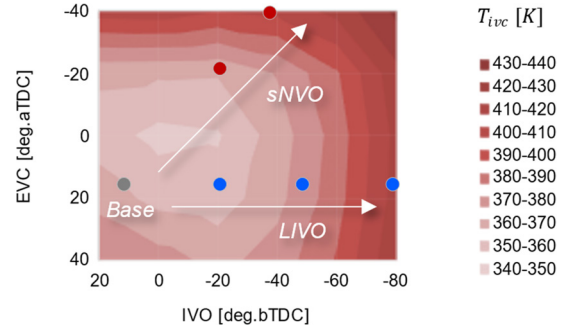


Fig. 4 T_{ivc} Obtained from TPA

4. LAS を用いた燃料噴霧の蒸発特性解析

LIVO あるいは sNVO が燃料噴射時期の筒内圧力とともに温度も制御を可能にすることを示した。この状態量制御による燃料噴霧の蒸発促進効果を検証するため、噴霧の液相及び気相濃度の同時定量計測が可能な二波長レーザー吸収散乱法 (Laser Absorption Scattering: LAS)⁽⁷⁾ を用いて、定容器内における噴霧単体の蒸発特性を解析した。Fig. 5 に、衝突平板と視野範囲を示す。衝突平板にはオイルを循環させることで壁面温度を調整できるようにした。本計測では、シリンダーライナー壁温がおよそ冷却水温 + 30°C 程度となる実機の測温結果に基づき、エンジン実験の冷却水温 35°C に対して油温を 65°C に設定した。燃料噴射には実機と同タイプの単噴孔インジェクタを用い、噴射量はエンジン実験の噴孔あたり噴射量と同等とした。燃料は、LAS 計測を行うため、ガソリンに物性が近く、266nm の紫外光を強く吸収し、532nm の可視光を吸収しないトルエンを用いた。雰囲気条件は、Base, LIVO, sNVO それぞれの燃料噴射期間中の温度・圧力を基に設定した。

LAS 計測によって得られた雰囲気条件違いの液相及び蒸気相濃度分布を Fig. 6 に示す。Base 条件に対し、LIVO, sNVO 条件では噴射開始後同一時刻において液相濃度が減少し、蒸気相濃度が増加している。また、LIVO 条件の蒸気相分布に着目すると、高濃度領域は少ないが高さ方向に厚みが増しており、雰囲気密度に依存する分子の平均自由行程が長いために蒸気相の拡散が速いことを示唆している。

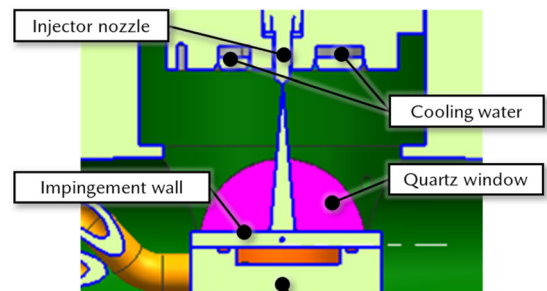


Fig. 5 Cross-Sectional View of the Impingement Wall

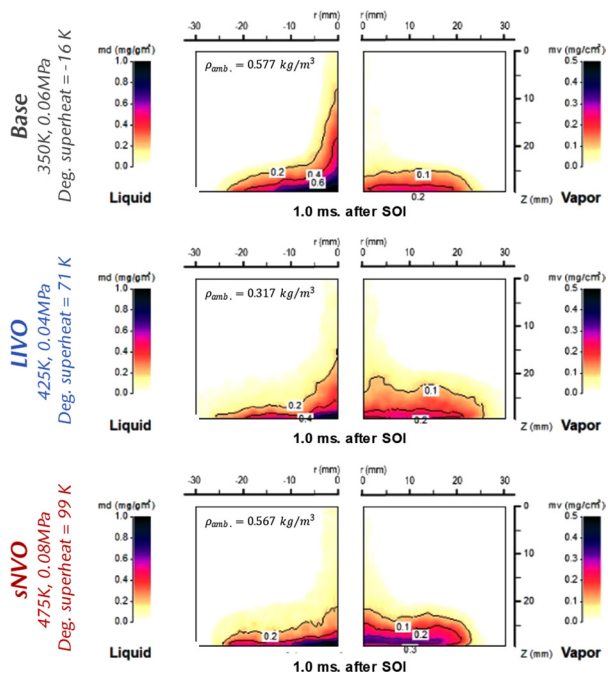


Fig. 6 Concentration Distribution Images of Liquid and Vapor Phases at 1.0ms. after SOI (Left: Liquid Phase, Right: Vapor Phase)

5. 筒内流動場における噴霧挙動の可視化

前章で調べた噴霧単体への雰囲気状態量影響に加え、エンジン筒内では吸気流動の影響を受けることが考えられる。実機同様の燃焼室構成をもつ可視化エンジンを用いて、筒内流動場における噴霧挙動を観察した。吸気行程噴射の噴霧液滴を観察するため、石英ガラス製のシリンダーライナーを用いて、CW レーザーシート光による液滴の散乱をサイドビューで撮影した。実験条件はエンジン実験の代表条件に対応したものである。Fig. 7 に、筒内可視化画像を示す。燃焼室中央排気 (EXH) 側から吸気 (INT) 側へ向かって、噴霧軸中心にレーザーシートを照射し、フロント方向から撮影した画像を、SOI を起点に時系列的に並べている。Base 及び sNVO 条件では、燃料液滴の多くが噴射方向に直進してシリンダーライナー壁面に衝突し、ピストン頂面 (図中白線) にも付着している様子が確認できる。しかし、Base 条件では噴射終了後もしばらく壁近傍や燃焼室内に浮遊する噴霧液滴が存在するのにに対し、sNVO 条件では壁面衝突後すぐに液滴の散乱は消失している。2つの条件は、流動による影響は小さいと考えられ、噴霧単体計測で見られた蒸発促進効果がエンジン筒内でも同様に確認されたものと推測される。一方、LIVO 条件では強い吸気流によって噴霧が拡散されるとともに、シリンダーライナー及びピストン壁面に沿って燃焼室外側から内側に向かう流動によって偏向され、一部の液滴は壁面付着を回避している様子が確認できる。更に、壁面衝突を回避した燃料液滴の散乱はすぐに消失しており、蒸発促進の効果も表れている。つ

まり、LIVO, sNVO 条件はともに蒸発促進効果がエンジン筒内でも確認され、加えて LIVO では強流動場の噴射による微粒化促進や壁面付着低減効果もあることが分かった。

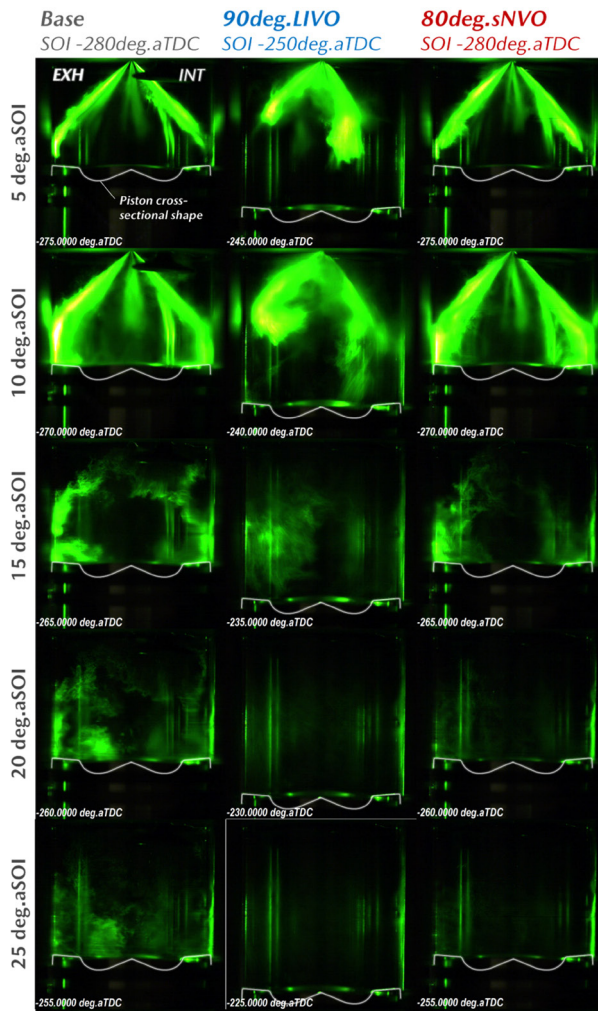


Fig. 7 Comparison of In-Cylinder Spray Images of Base, LIVO, and sNVO Conditions in Optical Engine

6. 高速 FID を用いた THC 排出挙動の解明

前章までに吸気行程中の LIVO, sNVO により発現する蒸発または輸送促進効果を明らかにした。本章では、排気行程に着目して排出挙動を詳細に調査し、吸気行程で現れた変化との因果関係を説明する。

THC の排出メカニズムを更に明らかにするために、排気ポートでの THC の時々刻々の排出挙動を計測した。計測は高速 FID (HFR500, Cambustion Ltd) を用い、排気ポートより直接サンプリングした。本手法により THC 濃度の排出挙動を 1msec 以下の時間分解能で定量的に理解することができる⁽⁸⁾。

1 サイクル当たりの THC 排出重量を求める方法について説明する。Fig. 8 に解析フローを示す。Step1: 1 次元シミュレーションを用い、排気バルブ通過から計測部ま

での排ガスの遅れ時間を補正し、バルブ通過時の THC 濃度の時間変化を求める。Step2: 排気バルブを通過するガス流量を Step1 と同様に 1 次元シミュレーションより求める。Step3: THC 濃度とガス流量と THC の密度を乗じて THC の質量流量を求める。THC の密度は JIS 規格 D1030 で定められている標準状態での密度 (0.577kg/m³, 20°C, 1atm) を元に、排ガスの温度と圧力を考慮して求める。

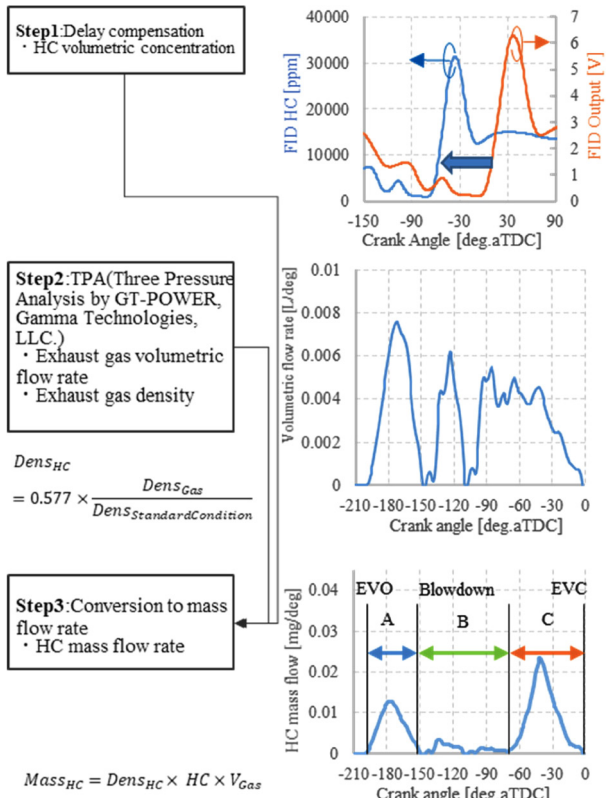
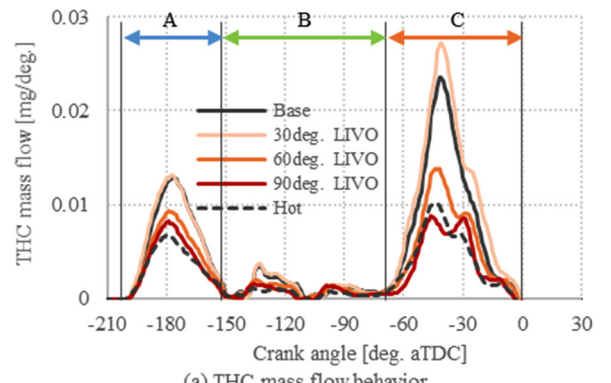


Fig. 8 Method to Calculate THC Mass Flow Rate

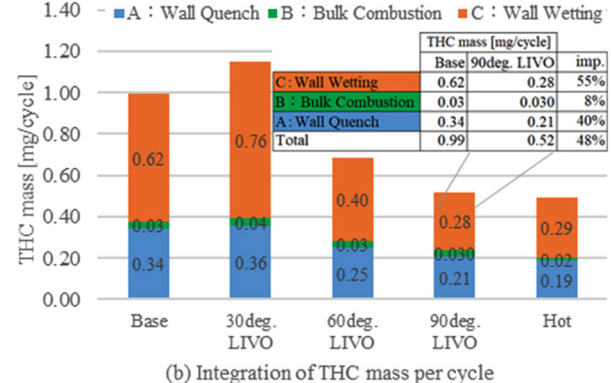
Step3 で得られる THC の質量流量の時間変化のグラフより、排気バルブ開時期 (EVO) 直後、及び排気バルブ閉時期 (EVC) 直前に 2 つのピークをもつことが分かる。EVO 後のピークを区間 A、EVC 前のピークを区間 C とし、その間を区間 B とする。それぞれの区間での THC 排出メカニズムは、区間 A では主に排気バルブ近傍で消炎した THC が排出され、次に区間 B ではバルクガス中の消炎や部分酸化等の燃焼に由来する THC が排出される。最後に区間 C では主にピストンによってシリンダーライナーに付着した燃料が掻き上げられて排出されると考えられている⁽¹⁾。本研究では 1 サイクル当たり排出される THC 重量を区間ごとに積算する 1 サイクル THC 重量分析を行った。

LIVO での 1 サイクル THC 重量分析結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) は区間 A から区間 C までの THC 質量流量の時間変化を示し、Fig. 9(b) は各区間の積算値を示している。Fig. 9(b) 中の表は Base と 90deg. LIVO の積算値の

比較と改善率を示している。Fig. 9(a) より IVC の遅角量を大きくすると区間 A、B、C の全区間で THC が低減していることが分かる。特に区間 A と区間 C での低減が顕著であり、90deg. LIVO まで遅角すると、黒破線で示した温間と同様な THC 排出挙動となることが分かる。次に、Fig. 9(b) に示した THC 重量の積算結果より THC 低減効果の定量化を行った。90deg. LIVO で見ると THC 低減率 48% でおおむね温間レベルまで低減していることが分かる。THC 低減の内訳は、区間 A の壁面クエンチ由来の THC が 40% 低減、区間 C の壁面付着由来の THC が 55% とともに大きく改善していることが分かった。これは 5 章に示したとおり LIVO では負圧場に吸気バルブを開くことで強流動が生成されることが分かっており、この強流動の効果が燃料の蒸発促進と壁面付着低減のいずれにも作用しており、ガス温度上昇効果との相乗効果により全区間で高い THC 低減を実現したものと考える。一方、区間 C で 30deg. LIVO の THC が Base に対して増加している。これは、30deg. LIVO では生成する負圧が小さく LIVO の強流動の効果が小さい上に、IVO を遅角することでオーバーラップが無くなり、内部 EGR が減少することで、Fig. 4 に示すようにガス温度が低下し、その結果、壁面付着の増加により区間 C の THC が増加したと考える。



(a) THC mass flow behavior



(b) Integration of THC mass per cycle

Fig. 9 Results of One Cycle THC Mass Analysis for LIVO Conditions

sNVO での 1 サイクル THC 重量分析結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) の THC 質量流量の時間変化より 80deg.

sNVO 以上で区間 C の THC が大幅に減少する点と、区間 B で sNVO 量に応じて THC が増加する 2 つの点が LIVO との相違として確認できる。

Fig. 10(b) に THC 重量の積算結果を示す。なお、80deg. sNVO と 100deg. sNVO は区間 C のピーク位置の特定が困難なため、他の Test ID と同様に上死点前 150 度から上死点前 70 度を区間 B とし、それ以降を区間 C とした。Fig. 10(b) より、80deg. sNVO で THC 低減率は 48% と、90deg. LIVO と同様に温間レベルまで低減していることが分かる。しかし、THC 低減の内訳は LIVO と異なり、区間 A の壁面クエンチ由来の THC が 25% 低減に留まり、区間 C の壁面附着由来の THC が 76% 低減と THC 低減効果の大部分を占めることが分かる。これはピストンが附着燃料を掻き出す前に排気バルブが閉弁され筒内に THC を留める排ガストラップの効果によるものであり、LIVO とは異なる THC 低減メカニズムである。なお、区間 B においては絶対値は僅かではあるがバルクの燃焼由来の THC が約 3.5 倍に増加している。これは sNVO では EGR の導入によって燃焼変動が増大していることから、EGR による燃焼悪化によるものと推測される。

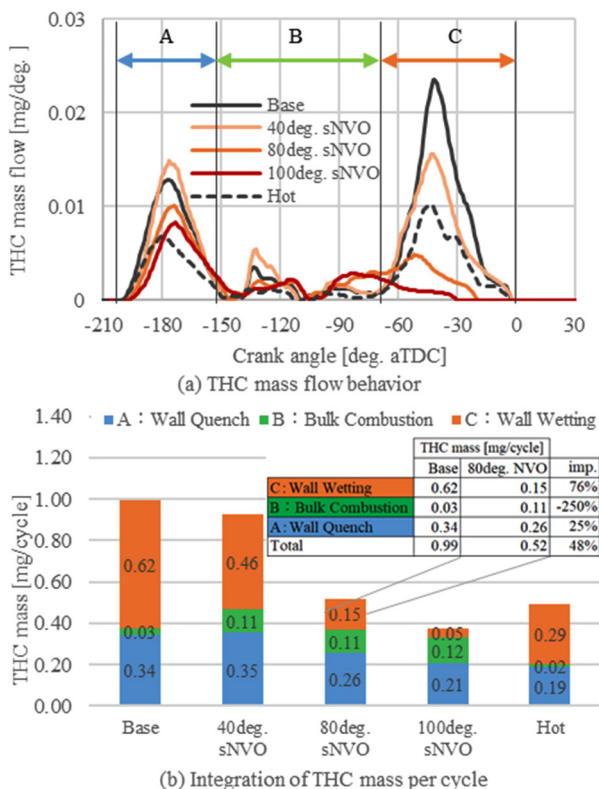


Fig. 10 Results of One Cycle THC Mass Analysis of sNVO Conditions

7. おわりに

筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減技術を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 可変動弁機構を用いて筒内ガスの状態量を制御する

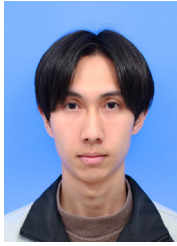
ことにより、液体燃料の蒸発を促進し、冷間における直噴ガソリンエンジンの THC と PN の低減が可能である。

- (2) LIVO, sNVO とともに液体燃料の蒸発促進効果が確認され、加えて LIVO では、負圧場に流入する強い吸気流動中に燃料噴射を行うことで、微粒化促進や壁面附着低減、及び混合気均質化の効果ももつ。
- (3) LIVO において、燃料の蒸発促進と壁面附着低減の効果による THC 低減は、区間 A, B, C の全区間で効果がある。特に区間 A で 40% 低減、区間 C で 55% 低減と両区間でともにおおよそ半減している。
- (4) sNVO において、区間 A は 25% 低減に留まり、区間 B においては悪化が見られ、sNVO は EGR による燃焼悪化により効果が目減りすることが分かる。一方、区間 C は 76% 低減と LIVO を大きく上回り、sNVO の THC 低減効果の大半を占める。これは筒内に THC を留める排ガストラップの効果によるものである。

参考文献

- (1) Heywood, J. B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc. (1988)
- (2) 森吉泰生ほか：ガソリンエンジンにおける粒子状物質の生成, 日本燃焼学会誌, 第 56 巻, 178 号, pp.298-307 (2014)
- (3) 山田智久ほか：冷間始動時における燃料供給状態の計測法の開発と機械学習による排気モデリングへの適用, 自動車技術会論文集, Vol.52, No.3, pp.653-658 (2021)
- (4) 神長隆史ほか：ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol.49, No.4, pp.751-757 (2018)
- (5) 堀隼基ほか：筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第 1 報), 自動車技術会論文集, Vol.54, No.4 (2023)
- (6) 堀隼基ほか：筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol.54, No.4 (2023)
- (7) 山川正尚ほか：ガソリン噴霧内混合気濃度分布計測のための二波長レーザー吸収散乱 (LAS) 法, 微粒化, Vol.11, No.35, pp.142-150 (2002)
- (8) Stefania, E. et al.: Effect of Engine Operating Parameters on Space- and Species-Resolved Measurements of Engine-Out Emission from a Single-Cylinder Spark Ignition Engine, SAE Technical Paper, 2019-01-0745 (2019)

■著者■



萩野 雄介



瀬戸 祐利



藤川 竜也



山川 正尚