

SIP「革新的燃焼技術」特集号

高熱効率を目指したディーゼル燃焼の研究

Research on Diesel Combustion Aiming at Higher Thermal Efficiency

石山 拓二, 川那辺 洋

Takuji ISHIYAMA, Hiroshi KAWANABE

京都大学

Kyoto University

1 はじめに

SIP「革新的燃焼技術」プログラムにおいて、ディーゼル燃焼チームは、乗用車用エンジンの大幅な熱効率向上を目指し、エンジン内燃焼の制御について、要素技術の研究開発に取り組んだ。この研究開発は、様々な面で AICE（自動車用内燃機関技術協同組合）の支援を受けながら大学および研究機関の研究者の手で行われた。本プログラムの全容については JST 公開情報¹⁾を参照されたい。以下に、この研究開発プログラムで実施されたディーゼル燃焼研究の概要と今後の課題について述べる。

2 研究のねらい

この研究の目標は、高負荷における 50% 正味熱効率、ならびに常用負荷における CO₂ 低減である。高負荷熱効率向上に対応する燃焼方法の考え方としては、混合律速燃焼を前提とし、噴霧火炎の制御により等容度の向上と冷却損失の低減を図ることとした。ここで、噴霧火炎が燃焼室壁面へ衝突・流動する際の壁面からの熱損失が冷却損失の大きな部分を占めることから、等容度と冷却損失の間にはトレードオフの関係が生じる。従って、狙いとする燃焼は、壁への衝突を和らげ冷却損失を減らしつつ、空間を無駄なく使い素早く燃焼させる噴霧火炎の形成をコンセプトとした。常用負荷における熱効率向上 (CO₂ 低減) に対しては、PGCI (予混合圧縮着火) 燃焼を取り入れることとし、実用上適用できる負荷範囲を制限する燃焼騒音を緩和する方法の研究を行った。

チーム内では、このような燃焼を実現するための主な課題を設定し、それぞれについて、下記のようにグループを編成して研究にあたった (大学、研究機関名はプログラム終了時)。

グループ 1: 総括、熱効率実証、噴霧モデル等数値計算の改善 (京都大、広島大、長崎大、鳥取大、産総研、滋賀県立大)

グループ 2: あと燃えの原因究明と低減 (明治大、早稲田大、徳島大)

グループ 3: 噴霧火炎の制御による冷却損失の低減 (同志社大、大阪工大、大阪大)

グループ 4: 燃焼のリーン化による PGCI および混合律速燃焼の改善 (東工大、滋賀県立大)

グループ 5: 構造・燃焼両面からのアプローチによる燃焼騒音の低減 (山口大、北海道大)

こ

のうち、グループ 2 および 3 は主に高負荷燃焼を、またグループ 5 は主に中低負荷燃焼を対象に研究を行った。なお、グループ 4 では、両負荷域ともに対象として研究を実施したが以下では高負荷燃焼の改善にかかわる研究内容を紹介する。なお、本チームにおいて、各種技術の燃焼改善、熱効率向上効果の評価には、共通仕様の単気筒試験機関 (口径/行程 85/96.9mm, EGR 付き外部過給) を用いた。

3 研究成果の概要

3.1 高負荷における熱効率の改善研究

(1) あと燃えの低減 (グループ2)

等容度を高めるには、総発生熱量の半分近くを占めるあと燃え(噴射終了後に続く熱発生)の低減が必要である。そこでまず、燃焼後期に発熱が起きている場所を特定するため、新たな可視化技術を開発した。これは、燃料中の芳香族炭化水素による紫外光吸収を利用した未燃燃料の可視化、OH*を始めとする紫外自発光による高温部の可視化、ならびに輝炎の可視化を同時に行う。これを定容容器内の自由噴霧火炎に適用し、輝炎の消失後も下流域において熱発生が続き、未燃混合気が残留している様子が観察された²⁾。このことから、あと燃えの要因を噴霧先端の過濃混合気と推定した。

この推定に基づいて、噴射終了後の噴霧先端の濃度を低下させる方法を検討し、噴射期間中に噴射率を徐々に減少させる「逆デルタ噴射率」を考案した。さらに、このような噴射率変化を実現するハードウェアとして、TAIZAC (TAndem Injectors Zapping ACTivation) インジェクタを開発した³⁾。これは、直列に接続された2本のインジェクタとその間にある小さな容積とで構成され、噴射に伴う小さな容積中の圧力降下を利用して逆デルタ噴射率を作る。最新のインジェクタにおいては、さらに、プレ・メインの多段噴射において、メイン噴射を高い噴射率にする一方で、プレ噴射の噴射率を下げ、着火補助機能を保つことや、メイン噴射の噴射率立上がり急峻にするなどの柔軟な噴射率制御を実現できる⁴⁾。逆デルタ噴射率による噴霧火炎の特性について、詳細反応LESによる数値解析⁵⁾、および全量ガスサンプリング・分析⁶⁾により検討し、負の噴射率勾配による噴霧軸方向濃度分布の平坦化と、噴霧外縁での渦発生による周囲空気導入促進の効果が過濃混合気抑制に役立つ可能性が示された。

この噴射系を単気筒試験機関に装備して試験を行った結果、高負荷(グロス図示平均有効圧力1440kPa, エンジン回転速度2250rpm)において、通常噴射率に対し図示熱効率の向上を得た⁷⁾(図1, 2)。分析の結果によると、この熱効率向上は、主に冷却損失の低減により得られており、燃焼期間の短縮はわずかである。噴射率漸減による噴霧貫徹力の抑制が冷却損失低減につながるが、噴霧火炎の壁衝突の影響もあって、噴射後期の乱流混合が十分でないと思われる、燃焼期間短縮の効果的な方法については、なお検討の余地が残されている。

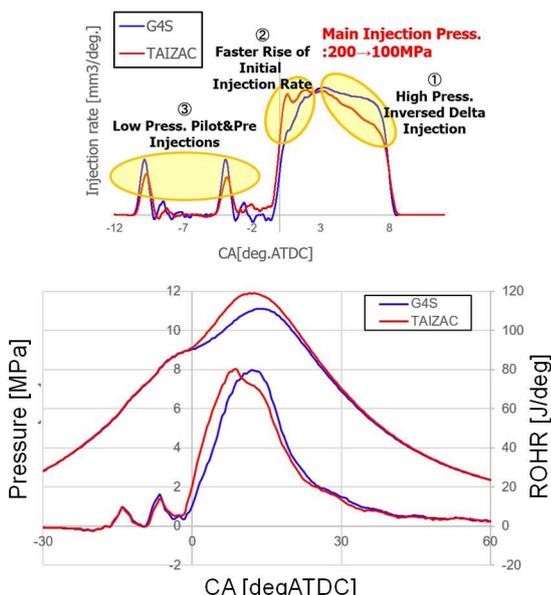


Fig. 1 Comparison of injection rate, in-cylinder pressure and heat release rate between TAIZAC and conventional (G4S) injection systems

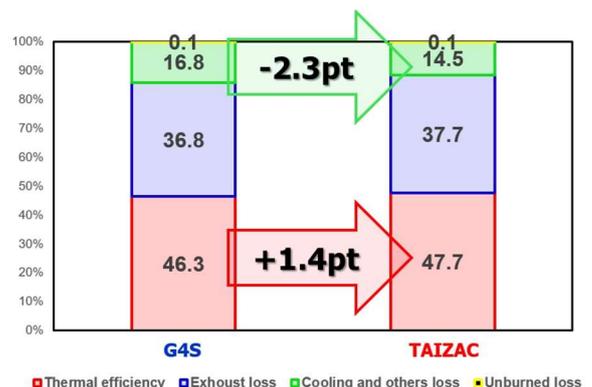


Fig. 2 Effect of injection rate pattern on heat balance

(2) 冷却損失の低減 (グループ3)

冷却損失の低減は、ノズル噴孔の小径化や燃焼室くぼみの大口径化による噴霧火炎の壁衝突の緩和によって得られるが、高負荷においてこれは概して燃焼室内の空気利用の不足につながり、燃焼期間が長くなる。すなわち、冷却損失と等容度との相反関係を緩和することがこの研究の要点となる。

まず、噴霧火炎の特性と壁への熱伝達との基本的な関係を調べた。平板に衝突する噴霧火炎を定容容器内に作成し、燃焼制御因子（噴孔径、噴射圧力、燃料温度、壁面距離など）を変化させて、輝炎・OH発光の高速撮影、および壁面熱流束の計測を実施した。その結果から、燃焼制御因子と熱損失との関係、ならびに火炎温度、流動、火炎の壁への接触面積などの物理因子と燃焼制御因子との相関を求めて、熱損失量への各制御因子の寄与度とその要因を明らかにした⁹⁾ (図3)。

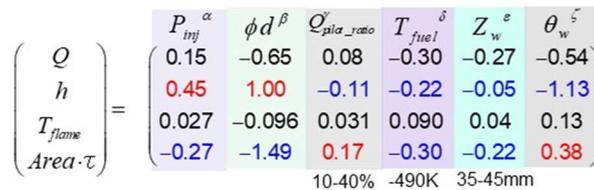


Fig. 3 Analysis of factors influencing heat loss for spray flames impinging on a flat wall in a constant volume vessel

(Q : cooling loss, h : heat trans. coeff., T_{flame} : flame temperature, $Area \cdot \tau$: contact area \times duration, P_{inj} : inj. press., ϕd : nozzle hole dia., Q_{pilot_ratio} : pilot fuel ratio, T_{fuel} : fuel temperature, Z_w : wall distance, θ_w : angle)

その結果によると、燃料温度の上昇による冷却損失の低減効果が大きく、噴霧角が大きく低貫徹力の噴霧火炎を形成していることが分かった。そこでまず、燃料温度の上昇により、低貫徹・高分散の噴霧火炎（コンパクト噴霧火炎）を作成することを試みたが、実機関ではノズル先端における燃料の十分な昇温が困難であった。そこで、燃料昇温による噴霧蒸発促進の効果を代替すべく、軽質な二つの成分からなる混合燃料（nペンタン + nデカン）を用いた噴霧火炎の特性と熱効率向上の効果を調べ、その要因を分析することとした。

二成分混合燃料（ML0.8：nペンタンの質量割合80%）を用いた単気筒機関による実験結果から、高負荷において、通常の軽油に比べて冷却損失の低減と図示熱効率の向上が確認された⁹⁾ (図4)。このとき、50%燃焼時期は遅れるが、それ以降の熱発生率が高いため、90%燃焼時期は早くなった。

通常軽油との差異を説明するため、定容容器を用いた蒸発噴霧の発達特性の計測、LIF/LIEF (Laser Induced Fluorescence/ Laser Induced Exciplex Fluorescence) を用いた噴霧構造の解析¹⁰⁾、RCEM (急速圧縮膨脹装置) を用いたOH*自発光と熱流束計測を実施した。これらより、半径方向に広がった噴霧が形成されていること、燃焼室くぼみ内で活発な発熱が行われているなどの特徴を明らかにした⁹⁾。

さらに、通常燃料によるコンパクト噴霧火炎の作成方法として、ザグリ付きノズル噴孔による噴霧の特性と熱効率への影響を調べた結果、二成分混合燃料には劣るものの、噴霧火炎の高分散化による熱効率向上の効果を確認した¹¹⁾。

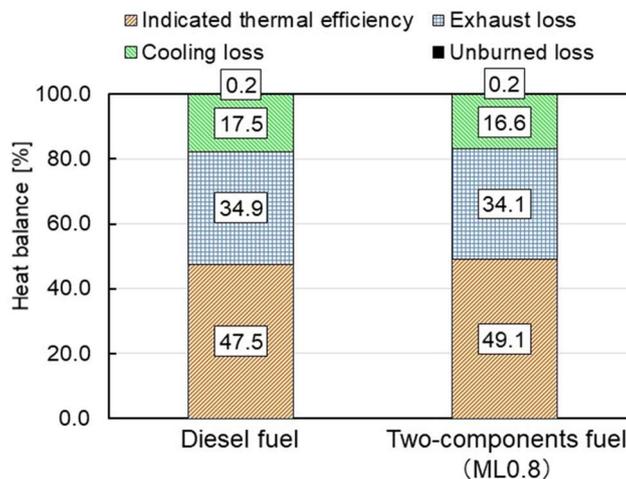


Fig. 4 Heat balance when using a high-volatility two-component fuel

(3) 燃焼のリーン化 (グループ4)

高温混合気と周囲気体を素早く混合して比熱比を上昇させることは熱効率向上に役立つ。そこで、従来よりも高い噴射圧力 (~350MPa) を用いてこれを実現することを試みた。

高負荷を対象とした研究においては、単気筒試験機関を用いて、超高压を含む噴射圧力の広い範囲における燃焼室形状ならびにノズル噴孔径・数の選択について検討を行った。

リップレス・トロイダル型の燃焼室を用い、直径と形状の異なる3種類のくぼみ (Piston A, B, C) を用いた試験を実施した。その結果、くぼみ形状によらず噴射圧力の上昇により燃焼期間、後燃え期間が短くなるが、燃焼終期の熱発生率形状にあまり変化がないことが分かった。図示熱効率は噴射圧力の増加に従い単調に上昇した¹²⁾ (図5)。

燃焼室くぼみによる性能および排気の違いを総合すると、超高压噴射による高負荷での燃焼改善効果 (高等容度と低冷却損失, 低エミッション) を活かすには、くぼみ口径がある程度大きく、壁面衝突後の噴霧火炎の流動が抑制できる側壁形状が望ましく、そのうえノズル直下の空間を確保し、噴霧根元の空気導入を阻害しないことが肝要であるといえる。

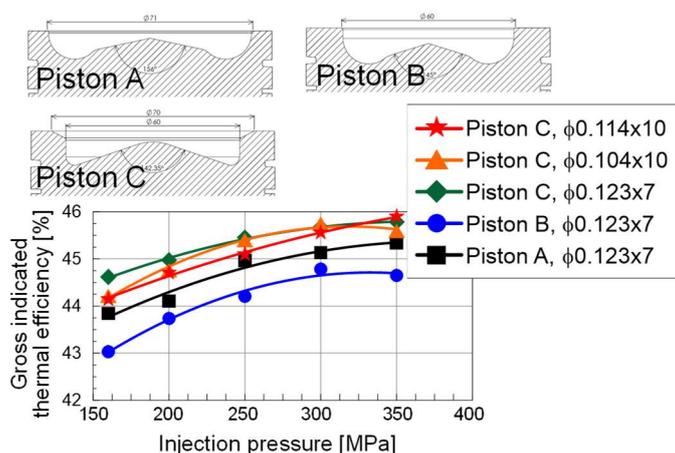


Fig. 5 Thermal efficiencies for various combinations of injection nozzle and piston bowl shape

(4) 熱効率の総合的検証 (グループ1)

熱効率の到達点を確認するため、損失低減チームの摩擦低減研究の成果を活用した圧縮比、筒内最高圧力の上昇、同チームの過給機高効率化の成果を取り入れた高過給化 (比熱比向上) など、基本的なサイクル効率向上手段をベースとし、本チーム内の研究成果に基づく噴霧火炎制御を加え、単気筒試験機関を用いて試験を行った。

燃焼系のベースを、冷却損失低減のためリップレスとした大口徑燃焼室に加え、高压噴射 (~270MPa) により混合促進を図る設定とした。噴射ノズルについては、従来からの知見に基づいて、小径多孔化が方向性として妥当と考えた。しかしながら、前述の研究成果による燃焼期間 (等容度) の大幅な短縮が容易でない。噴射圧力の制限の下で燃焼期間を短縮するには、ノズル流量を増して噴射期間を短縮することが必要と考えたが、従来の知見ではこれは冷却損失の増大を伴う。しかし、グループ3が得た燃焼制御因子・物理因子・熱損失の相関式 (図3) によると、ノズル径が大きくても壁への火炎接触時間・面積を減らせるなら壁面熱損失を低減できる。実際に、ノズル径を大きくし、単気筒試験機関による実験を実施したところ、冷却損失の低減と燃焼期間の短縮が同時に得られた (図6)。このような効果が得られる条件と限界については、今後なお検討が必要である。

さらに、冷却損失を徹底的に低減するため近接アフター噴射¹³⁾を用いた。これは、逆デルタ噴射率 (図1) の噴霧火炎貫徹力軽減効果を、従来より格段に短い間隔の多段噴射で再現しようとしたものである。これにより冷却損失の低減が得られ、燃焼期間の増加が最小限に抑えられた (図7)。冷却損失の低減は、メイン噴霧火炎の貫徹が抑えられたことによる。一方、燃焼期間増大の抑制は、メイン噴霧火炎が壁面衝突後に燃焼室中央部へ向かって流動する

のを抑え、燃焼室中央部の空間を使って後続噴霧を燃焼させることができたためと推定されるが、その詳細なメカニズムについてはなお検討を要する。最終的には、これに損失低減チームの成果である熱発電の効果を加え、熱効率の目標に到達した。

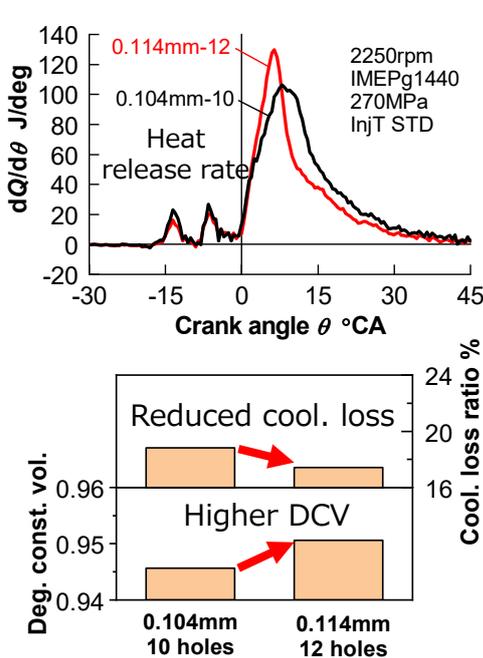


Fig. 6 Effects of a higher-flow-rate injection nozzle on heat release rate, cooling loss ratio and degree of constant volume

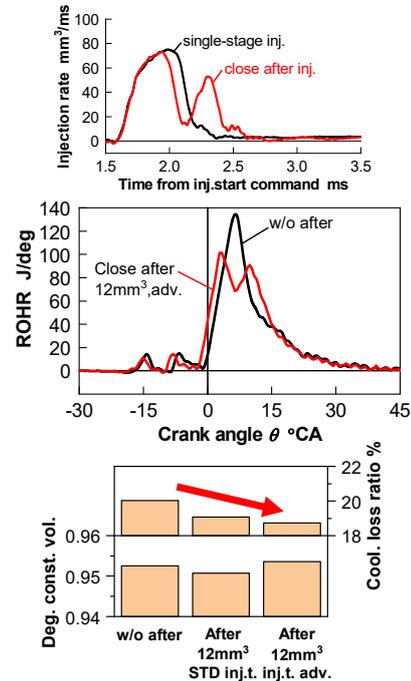


Fig. 7 Injection rate, heat release rate, cooling loss ratio and degree of constant volume of close after injection

3.2 中低負荷の燃焼改善 (グループ5)

前述のように、中低負荷については、PCCI 燃焼の利用を阻む燃焼騒音の低減を図ることを狙いと。そのために、エンジン構造の工夫（振動伝達の減衰・制御）と燃焼制御（熱発生率形状の制御）の両面から研究を実施した。

まず、単段のPCCI 燃焼に代わり、2段噴射により双峰形燃焼（二つの同程度の熱発生率ピークを生じる）とすることで初期燃焼の熱発生率を抑制し、燃焼騒音と冷却損失の低減を得た。また、熱発生率ピークの間隔を選択し、消音スパイク燃焼による騒音低減効果を利用することも可能になった¹⁴⁾。

熱効率をさらに向上させる方法を検討し、1段目の熱発生を2段に分けた噴射で生じさせることにより（図8、双w/3段）、燃焼騒音と冷却損失を低減した（図9）。プレ噴射（最初の噴射）による前期燃焼の緩和と、燃焼室壁面近傍における燃焼量および噴霧によって励起されるガス流動の減少が加わり冷却損失の低減につながったと考えられる¹⁵⁻¹⁶⁾。

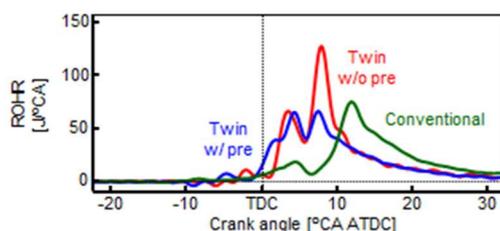


Fig. 8 Effect of pre-injection on heat release rate for twin-peak combustion

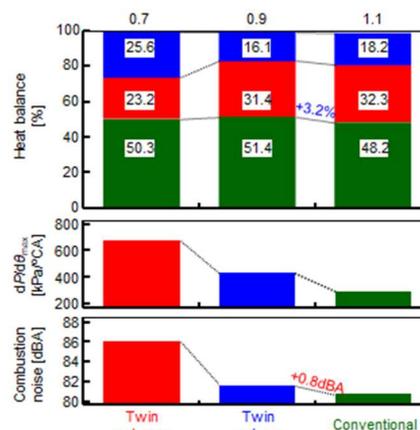


Fig. 9 Effect of pre-injection on heat balance, pressure rise rate and combustion noise

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

双峰形燃焼における消音スパイク効果に関して、単気筒試験機関による燃焼解析と騒音計測結果より、2段燃焼時の燃焼衝撃と放射騒音の時間・周波数特性を分析し、2段の燃焼が逆位相となる基本周波数およびその3倍の周波数における燃焼衝撃抑制効果、同位相となる基本周波数における衝撃増大効果を確認した。この結果に基づいて、コンロッドの仕様変更（オリジナルからSTP（Short Thinned Portion）コンロッドへ）によりピストン-コンロッド連成振動数を移動させることで、消音スパイク効果の周波数を構造に対して最適化し、さらに低騒音化が可能であることを示した¹⁷⁾（図10）。

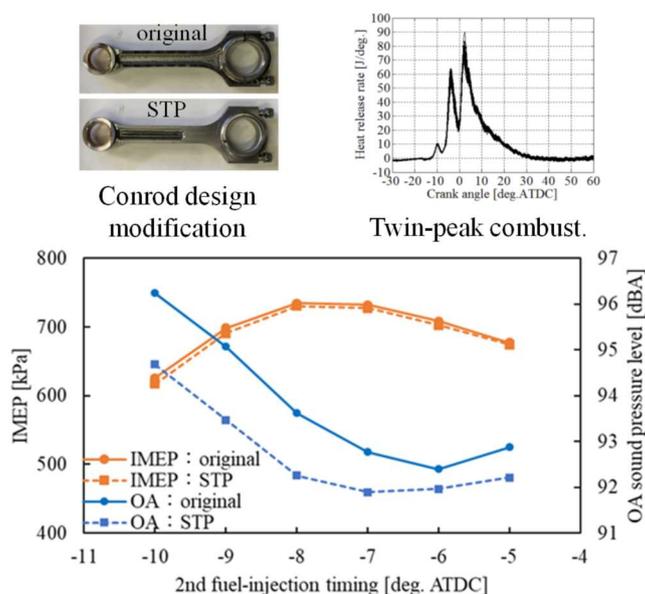


Fig. 10 Noise reduction by combining conrod design modification and twin-peak combustion

4 モデルの開発

本チームの研究を通じて基礎的なデータが蓄積されるとともに、それをもとに、以下に示す幾つかのモデル、および数値計算の精度向上に役立つ手法が得られた。詳細については関連の公表論文を参照されたい。

- ・噴霧形成モデル¹⁸⁻¹⁹⁾：ノズル内部形状とニードルの動きを入力し、ノズル出口流の速さや広がりなどの境界条件を計算する。CFD等との連携により噴霧燃焼計算の精度と汎用性を向上させる。
- ・CFDによる壁面熱伝達計算の精度向上²⁰⁾：壁関数をはじめとするサブモデルの選択により、壁面噴霧の流動および熱伝達計算を改善。
- ・高級炭化水素の簡略反応モデル²¹⁾：nC16までの炭化水素について、着火遅れの高精度予測が可能でCFD計算に適用できる新規な簡略化反応モデル。
- ・燃焼騒音モデル（骨子の作成）²²⁾：筒内における燃焼衝撃発生から騒音放射に至る物理過程について考慮した時間・周波数依存モデル。

5 おわりに

本研究開発プログラムにより、熱効率向上の観点から多くの有用な成果が得られた。ただし、有用と思われる技術について、そのメカニズムの詳細についてなお検討の余地がある。さらに低冷却損失・高速な燃焼を目指すためには、ディーゼル燃焼の現象理解をなおいっそう深める必要がある。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理人：JST）によって実施された。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

【参考文献】

- 1) http://www.jst.go.jp/sip/k01_kadai_siryu0129.html (参照 2019.08.28)
- 2) 近藤克文, 坂井亨輔, 栗林真幹, 相澤哲哉, 紫外自発光及び吸収法によるディーゼル噴霧火炎の後燃え現象解明手法の確立, 第26回内燃機関シンポジウム, 講演No.2, (2015).
- 3) 秋山忍, 遠山義明, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, ディーゼル機関熱効率向上のための直列2弁瞬時切替式(TAIZAC)インジェクタ, 自動車技術会2018年春季大会, 論文No.20185278, (2018).
- 4) 西川雄也, 植松孝喜, 丸山裕暉, 秋山忍, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, TAIZACインジェクタを用いた段別, 噴射中の噴射圧制御がディーゼル機関性能に与える影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.69, (2018).
- 5) 足立隆幸, 周ペイニ, 草鹿仁, 相澤哲哉, 詳細な素反応過程を考慮したLESによるディーゼル噴霧燃焼の当量比分布と熱発生解析, 自動車技術会2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 論文No.20185284, (2018).
- 6) 菊井瑠偉, 宮崎進之介, 中吉航大, 木戸口善行, 名田譲, ディーゼル噴霧の燃焼経過が燃焼ガス中の未燃成分濃度の履歴に及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.68, (2018).
- 7) 西川雄也, 植松孝喜, 丸山裕暉, 秋山忍, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, TAIZACインジェクタを用いた段別, 噴射中の噴射圧制御がディーゼル機関性能に与える影響, 第29回内燃機関シンポジウム, 講演No.69, (2018).
- 8) 前田篤志, 中田将徳, 荒井直之, 巽健, 松村恵理子, 千田二郎, ディーゼル噴霧火炎における壁面熱損失に関する研究(第5報), 自動車技術会2017年春季大会学術講演会講演予稿集, 論文No.20175014, (2017).
- 9) 荒井直之, 中田将徳, 前田篤志, 藤川詳也, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究—二成分混合燃料が効率・排気特性に及ぼす影響, 自動車技術会2018年春季大会, 論文No.20185005, (2018).
- 10) 西浦宏亮, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究(第3報)—二成分混合燃料およびノズル噴孔形状が噴霧のマクロ特性および内部構造に及ぼす影響—, 自動車技術会2019年春季大会, 論文No.20195299, (2019).
- 11) 藤川詳也, 荒井直之, 岩本誠也, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究(第4報)—ノズル噴孔形状が燃焼特性と熱効率に与える影響—, 自動車技術会2019年春季大会, 論文No.20195300, (2019).
- 12) 佐藤進, Pop-Paul Ewphun, 長澤剛, 小酒英範, 超高压燃料噴射がディーゼル燃焼の燃焼期間およびヒートバランスに及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.2, (2018).
- 13) Horibe, N., Bao, Z., Taguchi, T., Egoshi, K., Kawanabe, H. and Ishiyama, T., Improvement of Thermal Efficiency in a Diesel Engine with High-pressure Split Main Injection, SAE 2018PF&L meeting, Paper No.2018-01-1791, (2018).
- 14) Shibata, G., Nakayama, D., Okamoto, Y., and Ogawa, H., Diesel Engine Combustion Noise Reduction by the Control of Timings and Heating Values in Two Stage High Temperature Heat Releases, SAE Int. J. Engines, 9(2): 868-882, (2016).
- 15) 増子曜介, 稲葉一輝, 張焯赫, 小橋好充, 柴田元, 小川英之, 燃料噴射の分割による双峰形部分予混合化ディーゼル燃焼の熱効率改善特性, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.1, (2018).
- 16) Inaba, K., Ojima, Y., Masuko, Y., Kobashi, Y., Shibata, G. and Ogawa, H., Optimization of Multiple Heat Releases in Pre-mixed Diesel Engine Combustion for High Thermal Efficiency and Low Combustion Noise by a Genetic-Based Algorithm Method, Int. J. Engine Research, 20(1): 80-91, (2019).
- 17) 小口瞳史, 湊高貴, 角田佳規, 瀬尾健彦, 三上真人, コンロッド仕様と燃料噴射時期がディーゼルエンジンの放射騒音特性に与える影響の調査, 自動車技術会論文集 50(2): 285-290, (2019).
- 18) Huang, W. D., Moon, S. and Ohsawa, K., Near-Nozzle Dynamics of Diesel Spray under Varied Needle Lifts and Its Prediction Using Analytical Model, Fuel, 180: 292-300, (2016).
- 19) Oda, T., Hirata, Y., Ebara, R., Iuchi, D., Sumi, T. and Osawa, K., Investigation on a Simple Model to Predict Injection velocity and Spray Cone Angle for Sac Type Diesel Injectors, ICLASS 2018: ID219, (2018).
- 20) 堀司, 藤原巧, 坪倉誠, 解析的壁関数を用いた壁面衝突噴霧のCFD, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.18, (2018)
- 21) 桑原一成, 松尾直, 酒井康行, 小橋好充, 堀司, 松村恵理子, 千田二郎, 詳細反応機構の解読にもとづくノルマルトリデカンの簡略化反応機構の構築, 自動車技術会論文集, No.20174049, Vol.48, No.1, pp.27-33, (2017).
- 22) 三上真人, ディーゼルエンジンにおける燃焼衝撃のエネルギー蓄積・減衰・騒音放射, 日本機械学会2018年度年次大会, 講演番号 W071002, (2018).