乗用車用ディーゼルエンジンにおける高度燃焼制御

熱効率50%の達成

ィーゼル燃焼チーム 研究責任者:京都大学 大学院エネルギー科学研究科 教授 石山 拓二

燃料と空気の高度混合制御により、燃焼の高速化 と冷却損失・放射騒音の抑制を両立する新燃焼法 を開発する。そのために、①噴射による混合気制御 法の提案、②後燃え現象の解明と低減、③噴霧制 御による冷却損失抑制、④超高圧噴射によるPCCI 燃焼制御、⑤燃焼とエンジン構造による放射音制 御の研究開発を行う。



研究拠点 堀場製作所本社・工場内 京都エンジン実験センター



新燃焼法の提案と実証
 噴霧形成モデルの構築

混合気制御法の提案と噴 混合気計算の高精度化

放射音低減グループ

が

大きい

構造改善·位相差燃焼

放射音低減-9.5dB

構造・燃焼両面からの 対策により エンジン放射音を低減

エンジン構造内振動伝達・音放射のモデル化
 燃焼パターンの制御による放射音低減と高効率化





Combustion

高等容度と低冷却損失を両立する高速・低冷却損失燃焼技術を構 築し、損失低減技術とともに正味熱効率50%を達成

▶ CFD 解析により、壁面に沿う高温火炎の流動が冷却損失の主因と特定、火炎の壁接触緩和と低流動化 (大口径燃焼室)、な らびに高等容度のための高噴射率・混合促進(270MPa 噴射・小径多噴孔ノズル)を燃焼系の基本とした(図1)。

高等容度をねらって 燃焼期間を短縮すると 冷却損失が増加する。

容器実験(同志社大学)と運動量理論に基づく考察により、大流量ノズルを採用しさらに冷却損失低減・等容度向上(図2)。 ▶ 漸減噴射率 (逆デルタ噴射率 : 明治大学) を模擬し火炎の壁接触緩和を図るとともに、噴射休止期間を活用し残余空間利用 の効果を加えた超近接多段噴射により、等容度を保ったまま冷却損失をさらに低減(図3)。

▶ 上記技術に高圧縮比化と高過給化*を加え、グロス熱効率がベース機関より6%pt.以上向上することを単気筒試験機関で実 証し、低摩擦化*、熱電発電*の効果を加えて正味熱効率50%を達成した。(*は損失低減チームの成果活用)



2250rpm、燃料噴射量32.6mg(高負荷)

キな

関連論文

噴射制御の制約によ

り、効率・エミッショ

ましい熱発生率パ

ターンの作成が困難。

① Horibe,N., Kawanabe,H., Ishiyama,T., et al.: Improvement of Thermal Efficiency in a Diesel Engine with High-pressure Split Main Injection, SAE 2018PF&L meeting, Heidelberg, Paper No.2018-01-1791, (2018).



▶ 噴射圧力・時期・期間を独立して制御できる二つの噴射弁を備えた燃焼系(図1)を用いて様々な燃焼パターンを作成。

▶ 多段噴射において二つの噴射弁を使い分けて排出スモークを低減できることを示した。これは、可視化機関を用いたボトム ビュー撮影により、メイン噴霧の経路上にあるパイロット噴霧由来の混合気の濃度が低下するためと考察した(図2)。

ン・騒音の点から望
K低負荷においてPCCI燃焼の熱発生率ピークを低下させ、その分をピーク直前に漸増する熱発生率として加えることが低騒音と 高等容度の両立に有効と考え、これを三段噴射と噴射弁の使い分けにより実現し、その効果を実証した(図3)。

> ▶ 噴霧燃焼に与る燃料量を減らして冷却損失を低減し、高等容度を得ることをねらいとした燃焼法(zPCI)を提案し、単気筒試験機 関を用いて熱効率向上効果を検証中(図4)。



メカニズム成立条件:SIP単気筒エンジン、 高負荷(zPCI)、低負荷(漸増熱発生率)

モデル/ソフトウェアへの繋がり:各種燃焼シミュレーショ ンの検証データを提供。

今後の課題:新燃焼法(zPClなど)の効果検証。

主な 関連論文

①堀部直人ほか : 二系統の燃料噴射システムを備えたディーゼル機関の性能と排気 , 自技会論文集 Vol.48,No.2, p.219-224, (2017), ②桑 原洋樹ほか : ディーゼル PCCI 燃焼において熱発生率形状が燃焼騒音に与える影響 , 日本機械学会関西支部第 92 回定時総会講演会, 講演論 文集 No.174-1, p.172, (2017).

後燃え現象は噴霧先端過濃混合気が主因であることを解明し、噴霧軸方向燃料濃度分布 を均一化する逆デルタ噴射率コンセプトを構築

グループリーダー:明治大学 理工学部 准教授 相澤 哲哉

後燃えの現象理解が不 足してい<mark>る。解決手段</mark> として有効と思われる 噴射率可<u>変噴射系が</u>な い。 先進的光学計測(図1)、実機筒内可視化(図2)、詳細反応LES数値解析(図3)、全量ガスサンプリング成分分析(図4)により、 後燃え要因を噴霧先端過濃混合気と特定。

段 ▶ 噴霧軸方向濃度平坦化による先端過濃混合気生成抑制 (後燃え低減)、壁面衝突抑制 (冷却損失低減)を狙った逆デルタ (漸 る 減)噴射率コンセプトを案出、詳細反応 LES 数値解析によりポテンシャルを把握。

 逆デルタ噴射率に加え、中圧プレ噴射、初期噴射率立上げ急峻化等の噴射率制御を簡便な機構で実現するTAIZAC (TAndem Injectors Zapping ACtivation: 直列2弁瞬時切替式) インジェクタを開発(図5)。

▶ 単気筒機関による試験により、従来噴射に比べ大幅な冷却損失低減を確認、図示熱効率の向上を実証。



メカニスム成立条件: SIP 単気筒エンジン、
 2250rpm、噴射圧力200MPa、噴射量
 39mg (高負荷条件)

モデル/ソフトウェアへの繋がり:各種燃焼シミュレーションの検証データを提供。

今後の課題:噴射システムの高圧化および噴射率制 御性向上、後燃え低減および燃焼期間短縮効果の向 上。

<u>主な</u> 関連論文

冷却損失と等容度との

果的な冷却損失低減が

できない。

iesel Combustion Team

① Kondo et al.:IJER v18(1-2) p93-104(2017), ②長谷川ほか : 自技会論文集 v49(3) p581-586(2018), ③ Mohd Fareez et al.:SAE2018-01-1793(2018), ④ Zhou et al.:SAE2018-32-0066(2018), ⑤秋山ほか :JSAE20185278(2018), ⑥足立ほか :JSAE20186311(2018)

冷却損失低減グルーフ



▶ 冷却損失低減に必要な制御因子を容器実験により検証、指数相関からトレードオフを解消する制御因子を解明(図1)。

間、ならびに冷却損失 制御因子間にトレード オフの関係があり、効

▶ RCEMを用いて二成分混合燃料によるコンパクト噴霧火炎を確認、熱流束計測により冷却損失低減のメカニズムを解明(図3)。

▶ エンジン内の冷却損失を高精度に予測する計算手法を構築し、冷却損失低減の予測に一部成功(図4)。



メカニズム成立条件: SIP単気筒エンジン、 2250rpm、IMEPg=1440kPa (高負荷条 件) モデル/ソフトウェアへの繋がり: 簡略化反応機構、反応計 算高速化手法、冷却損失予測精度向上法(壁関数など)を提 案 今後の課題:実用的手段によるコンパクト噴霧の効 果拡大。



① 巽健: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3報),自動車技術会論文集,Vol49,No.2 (2018),pp138-143 ② 荒井直之: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1報),自動車技術会論文集,投稿中,③ Hori,T. et al.: Three-Dimensional Simulation of Heat Transfer in Diesel- Spray Flame Impinging on Flat Wall using Skeletal Mechanism of n-Tridecane, COMODIA, B107 (2017).

着火遅れ時間および熱発生プロフィールを高精度に再現可能な 高級炭化水素の簡略化反応機構を構築

グループリーダー:同志社大学 理工学部 教授 松村 恵理子

供試燃料の簡略化反応 > ノルマルトリデカン、ノルマルヘキサデカンなどのディーゼルモデル燃料について詳細反応機構が記述する着火遅れ時間 機構は存在せず、数値 の温度・圧力・当量比・EGR率依存性および着火過程の熱発生プロフィールを高精度に再現可能な簡略化反応機構を構築(図 解析には他燃料の既存 1、2)。 簡略化反応機構を代用 → 知識に基づく経験的簡略化であるが、小規模と高精度の両立という点で数理的アルゴリズムによる簡略化を凌駕する。 していた。 → 三次元噴霧燃焼計算の高速化、数値解析によるディーゼル燃焼現象解明の信頼性向上に大きく貢献する(図 3)。



そ応内各・計和反応破価が記述する有大反応経路を辨認することにより得られた知識に基づき、任意のディーゼルモデル燃料について着火現象の再現に特化した簡略化反応機構を構築する経験的方法を確立した。

新知見: ノルマルヘキサトリデカンでは詳細反応機構に 対して化学種数2337→55、反応数5530→96の簡略化 と広範な条件における着火遅れ時間再現精度+/-10%以 内の両立を実現した。 今後の課題:簡略化反応機構の拡充、 三次元噴霧燃焼計算の高精度化、数 値解析による燃焼制御手法の原理解 明



① Kuwahara,K., Matsuo,T., Sakai,Y., Kobashi,Y., Hori,T. et al. : Reduction of Reaction Mechanisim for n-Tridecane Based on Knowledge of Detailed Reaction Paths, SAE 2016-01-2238 (2016) ② Hori,T. et al. : Three-Dimensional Simulation of Heat Transfer in Diesel-Spray Flame Impinging on Flat Wall using Skeletal Mechanism of n-Tridecane, COMODIA2017, B203 (2017)

超高圧噴射グループ

Combustion

esel



▶ 急速圧縮膨張装置(RCEM)を用いた単一噴霧燃焼の可視化実験により、350MPaの上死点噴射で輝炎が発生しないこと を確認し、上死点近傍超高圧噴射により PCCI 燃焼が実現できることを提示 (図1)。

超高圧噴射 (350MPa) における噴霧発達・混 合気形成・燃焼特性が 不明。

主な

関連論文

▶ 単気筒機関による低負荷条件の燃焼実験により、高 EGR・上死点近傍での超高圧単段噴射により PCCI 燃焼が実現し、高い▶ 熱効率を得られることを確認 (図 2)。

- ▶ 単気筒機関による中低負荷条件の燃焼実験により、高 EGR と組み合わせることで高効率・低騒音の多段燃焼が実現できる ことを確認し、超高圧パルス噴射燃焼のコンセプト成立を確認(図3)。
- ▶ 高負荷条件への超高圧噴射適用は、燃焼室形状の最適化により熱効率向上に寄与可能(図4)。



①佐藤, 中澤, 小酒:"燃料噴射パラメータの最適化による PCCI 燃焼の効率改善に関する研究", 日本機械学会 2017 年度年次大会(2017)、 ②佐藤, 中澤, 小酒:"超高圧燃料噴射を用いた PCCI 燃焼制御法に関する研究", 第 28 回内燃機関シンポジウム(2017)③佐藤, Ewphun, 長澤, 小酒:"超高圧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(2018)

多段噴射双峰形燃焼と内部伝達系振動数移動により、放射音を増大させることなく 高熱効率を得る技術を構築

グループリーダー:山口大学大学院創成科学研究科教授 三上 真人

PCCI 燃焼において放射 音が過大となることで、 運転領域が制限される。

Diesel Combustion Team

▶ 単段 PCCI 燃焼を双峰形燃焼 (二つの同程度の熱発生率ピーク)とすることで初期燃焼を抑制し、燃焼騒音低減と冷却損失 低減を実現。消音スパイク燃焼による消音効果の利用も可能に。

▶ 双峰形燃焼の一段目の熱発生を二段に分けた噴射で行うことにより(図1、双 w/3 段)、さらに騒音と冷却損失を低減。基準燃焼と同程度の燃焼騒音のもと、熱効率を向上させ CO2 を低減可能であることを中低負荷で確認。

► コンロッドの仕様変更 (STP 化) によりピストンー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確認 (図2)。



メカニズム成立条件:単気筒機関(SIP、 北海道大学)、中低負荷(1500rpm・ IMEPg0.4MPa、2000rpm・0.7MPa)

主な

関連論文

モデル/ソフトウェアへの繋がり:燃焼データは各種燃焼シ ミュレーションの検証データ。騒音モデルは1Dモデルに利 用可。 **今後の課題**: 双峰形燃焼と構造的手法の相乗効果拡 大。

①増子曜介,他: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 (2018)、②小口 瞳史,他: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 2018 年春季大会(2018)





