

論文の要旨

題目 混合気濃度と温度分布および着火と熱発生率の制御によるディーゼル燃焼改善に関する研究
(Research on Improvement of Diesel Combustion by Controlling Distributions of Mixture Concentration/Temperature and Ignition/Heat Release Rate)

氏名 志茂 大輔

ディーゼル乗用車の普及により、エンジン本体の高い熱効率と、燃料精製過程の両面から CO₂ 排出の抑制が可能である。また新興国などの火力発電に依存する地域では電気自動車を凌ぐ well-to-wheel の CO₂ 排出抑制効果が望め、燃料インフラが整っている点からも環境・エネルギー問題解決の現実的な切り札として期待されている。しかしながら、そのためには元来の高い熱効率の更なる追求に加えて、ディーゼルエンジンの宿命である排気低減を低コストで達成する必要がある。これを実現するための一つの可能性に、高価な NO_x 排気後処理装置や電気デバイスに頼らず、エンジンの燃焼を徹底的に改善する方法が考えられる。そこで本研究では「燃焼改善による排気と燃費の低減」を目的にして、そのための有効な燃焼改善手法の提案と検証に取り組む。

第 1 章では、ディーゼル燃焼において排気と燃費を支配するメカニズムとその制御因子についての体系的な分析と従来研究の振り返りを行った。これにより、排気と燃費を支配する基本機能 (=性能を支配する統括的な自然現象) は「混合気の濃度すなわち局所当量比 ϕ と温度 T の分布」および「着火・熱発生率」に集約され、これら 2 つの基本機能を最適な状態に制御することで最大限の排気と燃費の低減効果が得られると考えた。そのためには制御目標とすべき 2 つの基本機能の最適な状態を定め、その制御因子を明らかにし、その上で実現可能な制御手段を提案・検証することが有効な研究プロセスであると考え、次章以降でこれに取り組んだ。

第 2 章では、先ず「混合気 ϕ - T 分布」の最適状態 (=最大限の排気低減効果を得るための制御目標) について 0 次元理論燃焼計算による基礎的な解析を行った。これにより燃焼前期には Soot 生成をある程度抑制するため $\phi < 3$ 程度とし、燃焼最盛期においても NO 抑制のために $T < 2000\text{K}$ とし、燃焼後期には CO・HC および Soot の酸化を促進するため $T > 1500\text{K}$ かつ $\phi < 1$ の混合気分布に制御され状態を「混合気 ϕ - T 分布」の最適状態と定めた。全燃焼期間において Soot の生成を回避すること ($\phi < 2$) を重視した幾つかの従来研究と異なり、燃焼初期の若干の Soot 生成を許容し、燃焼中後期の酸化促進による Soot および CO・HC の同時低減を重視するのが本研究が目標とする燃焼の特徴である。次に「着火・熱発生率」の最適状態についての 0 次元エンジン熱力学計算による基礎的な解析から、燃費が最良となる上死点付近の着火時期および短い燃焼期間、かつ燃焼音の制約まで熱発生率傾き・高さを低下させた状態を「着火・熱発生率」の最適状態と定めた。

第 3 章では、第 2 章で定めた「混合気 ϕ - T 分布」と「着火・熱発生率」の最適状態に近づけるための

燃焼制御手段として、燃料噴射終了後の着火による予混合型燃焼でありながら噴射時期による着火時期制御が可能な ITIC-PCI(Intake Temperature and Injection Controlled - Premixed Compression Ignition)燃焼コンセプトを提案し、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析と実機エンジン試験によってその効果を検証した。ITIC-PCI 燃焼コンセプトにおいては「混合気 ϕ -T 分布」と「着火・熱発生率」を最適状態に近づけるための制御因子として吸気酸素濃度低下、長すぎない予混合期間、適切な筒内圧縮端温度、および余剰酸素量の確保を用いる。吸気酸素濃度低下により最高火炎温度を抑制し、長すぎない予混合期間により燃料噴射時期操作による着火時期制御性を確保しながらも、燃焼初期の過濃 ϕ 混合気を少なくして Soot 生成をある程度抑制する。適切な筒内圧縮端温度 T と余剰酸素量の確保により燃焼後期での CO・HC および Soot の酸化を促進する混合気 ϕ -T 分布に導く。制御手段には大幅な吸気冷却が有効であるが、低圧縮比化と過給を組合せへの制御手段の置き換えが可能である。CFD 解析によって狙い通りに混合気 ϕ -T 分布が制御できていることを確認し、実機エンジン試験によって従来の燃焼から、CO・HC の悪化を抑制しつつ、NO_x、Soot および燃費の大幅な低減効果を確認した。

しかしながら予混合型燃焼である ITIC-PCI を量産実用化するためには、過渡条件を含めた様々な走行場面で生じる筒内環境の変化に対しても安定した性能を出力することが求められる。その有効な解決策となる着火時期の自動制御に第 4 章で取り組んだ。化学反応速度を表現した Arrhenius 式を基に、筒内の平均温度 T、圧力 P、および当量比 ϕ を支配する噴霧混合気形成に関わる制御因子を入力項として拡張し、時間履歴については Livengood-Wu 積分によって表現し、更に実験計画法による実機エンジン計測結果から定数を最適化したモデル式によって着火遅れ期間を予測した。この予測に基づいて燃料噴射時期を操作して着火時期を制御するシステムを構築し、このシステムを実機エンジンの制御ユニットに実装することで、過渡条件における適切は着火時期制御を可能とした。

第 5 章では、ITIC-PCI 燃焼コンセプトを適用できない、高負荷の拡散型燃焼条件において「混合気 ϕ -T 分布」と「着火・熱発生率」を最適状態に近づけるための制御手段として、ピストン燃焼室内の縦渦を利用するコンセプトを提案し、圧力容器を用いた噴霧挙動の計測、CFD 燃焼解析、および実機エンジン試験によりその有効性を検証した。まず、貫徹力の強い噴霧をラウンド型燃焼室の壁面沿いに入射し、燃焼時の体積膨張に伴う加速も利用して、燃焼室内に強い縦渦流動を形成する EVVC (Expansive Vertical Vortex Combustion) コンセプトによって、噴霧先端部の高温既燃ガスを燃焼室中央部に存在する低温の余剰空気中に拡散させることで高温既燃ガスを早期に冷却できることを CFD 解析で検証した。サーマル NO の生成速度は緩慢なため、高温既燃ガスの早期な冷却によって NO 生成量の低減が可能である。燃焼室形状と噴霧の仕様を変更して縦渦流動を強化することによる有意な NO_x 低減効果を実機エンジン試験によって確認した。しかしながら、燃焼室容積が大きく、噴霧貫徹力の弱い小径多孔ノズルの使用が前提となる低圧縮比エンジンにおいては EVVC コンセプトの適用が難しくなる。そこで次に、燃焼室断面形状を工夫して低圧縮比エンジンにおいても強い縦渦を形成可能で、かつ燃焼後期における空間利用についての縦渦の機能の拡張を図った Egg 燃焼室コンセプトを提案した。燃焼室への噴霧の入射角度の最適化および曲率半径を連続的変化させた卵型の曲線によって噴霧の運動エネルギーの損失を

抑えて、縦渦の中心と燃焼室の卵形状との中心が一致するバランスの取れた強い縦渦を形成する。これによって、燃焼中期に燃焼室内下部の壁面付近に停滞しがちな過濃 ϕ 領域を縦渦による空気との混合によって解消し、前述の高温既燃ガスの早期冷却によるNO_x低減を図りつつ、更に燃焼後期にはピストン降下によって生じるスキッシュエリアへと縦渦を導いて既燃ガスと空気との混合を促進する。混合気 ϕ のリーン化が進んでSootが酸化されるとともに、燃焼が活発になって燃焼期間が短縮される。これらのメカニズムを、高温高压容器内に設置した二次元燃焼室壁面への衝突噴霧の二色法による計測解析、およびエンジン燃焼条件でのCFD燃焼解析によって検証し、更に実機エンジン試験によって、Soot、NO_xおよび燃費の有意な低減効果を確認した。

前述のITIC-PCI燃焼コンセプトの実用化には低圧縮比が必要であったが、その実現にはエンジン始動時の噴霧混合気の着火性改善が課題となる。そこで第6章において、着火性改善のための制御手段として最新の高性能インジェクターによって可能となった微少噴射量化に着目し、液滴相と蒸気相を分離可能な二波長レーザー吸収散乱法による噴霧挙動の計測解析によってその可能性を検討した。微少噴射量化によって噴霧の到達距離を大幅に抑制できる。これは噴射期間が短く噴霧到達距離成長のための運動量投入が早期に終了することに加えて、ノズル内シート部でニードル弁が微少リフト状態になることによる絞り効果でサック内での燃料圧力低下によるものである。この効果は非蒸発噴霧において特に大きく、非定常噴霧の微少噴射量噴霧の到達距離の成長は早期に鈍化して一定値となる。蒸発噴霧の場合も噴霧到達距離は微少噴射量化によって大幅に抑制されるが、噴射終了後しばらく経った後でも噴霧到達距離および噴霧幅が成長を続けることが分かった。これは噴霧の境界領域における燃料蒸気の濃度勾配によって分子拡散が継続するためであると考えられる。以上より、高性能インジェクターを用いた微少量噴射を多段化することで、噴霧到達距離が抑えられた着火し易い過濃混合気が形成され、更に燃焼室壁面との干渉による噴霧液滴の蒸発悪化や冷却損失が軽減されるため、有効な「着火性」改善手段となることが期待されることが分かった。

第7章では、多段微少量噴射による始動性改善効果について、低圧縮比エンジンでのアイドル停止からの再始動を対象にして、CFD燃焼解析と実機エンジン試験による検証を行った。アイドル停止からの再始動におけるスタータ駆動開始後の最初の圧縮行程は、極低回転に伴うピストンリング隙間からの漏れ損失、および初期ピストン位置によっては実ストロークが短くなるため、圧縮端の温度と圧力が十分に上がらず着火の成立が難しい筒内環境となる。この条件において圧縮行程後半に多段で微少量噴射を行うことで、着火し易い燃料過濃な混合気が形成できることをCFD燃焼解析によって検証した。更に、このような混合気によって上死点前に火種となるプリ燃焼を形成することで「着火性」を改善し、良好な始動性を達成できることを実機エンジン試験で確認した。

以上の燃焼改善への取り組みによって排気と燃費の有効な低減を達成し、第8章に結論としてまとめた。なお、本研究における知見の一部は、2012年から量産化されているMazda SKYACTIV-Dエンジンに採用され、ディーゼル乗用車の普及による環境・エネルギー問題の対策に寄与している。