

3180-28

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

高負荷予混合圧縮着火燃焼に関する研究
(Emissions Reduction at High Load Conditions
Using a Premixed Compression Ignition Engine)

申請者
橋詰剛

Takeshi Hashizume

2000年11月

内燃機関は現代における我々の生活に必要不可欠である反面、石油資源を消費し、有害物質を排出して環境を汚染する。このため、低公害・高効率化への社会的要求は強く、また内燃機関の重要性が増せば増すほどこれらの要求は高まるであろう。直接噴射式ディーゼルエンジンは最も熱効率の高い内燃機関であるため、物流の分野での主力原動機として広く使用されている。しかし、その反面、有害物質である窒素酸化物 (NO_x) やスモーク (PM) の排出が他の内燃機関に比べて多く、都市部においては社会問題に発展している。

内燃機関の大幅な低公害化と高効率化を実現するための手段として、直接噴射式ディーゼルエンジンの排出物低減が有効な方策と考えられる。本研究では、ディーゼルエンジンの排出物のなかでも、特に難しいとされている高負荷運転条件における NO_x の大幅低減を目指して、二段ディーゼル燃焼および層状混合気の圧縮着火燃焼という、従来とは異なる新しい燃焼コンセプトを提案した。単筒エンジンによる実験的研究を実施し、排出物低減や高効率化への可能性を追求した。さらに、可視化エンジンによる燃焼観察や燃焼シミュレーションにより現象に対する考察を加えた。これらの成果を以下に述べる。

1. 二段ディーゼル燃焼（時間分割MULDIC）の排出物特性

従来のディーゼル燃焼では、予混合燃焼と拡散燃焼が連続に行われているため、両者を同時に制御する手法が種々試みられているが、そのための明確な燃焼コンセプトは確立されていないのが現状である。これは、予混合燃焼と拡散燃焼は全く形態の異なる燃焼であり、従来の手法では一方を改善すると他方が悪化するためである。

そこで、ここでは、予混合燃焼と拡散燃焼を時間的に二段に分割し、各々の燃焼を独立にコントロールし、燃焼領域の局所温度を低減する新しいコンセプトの二段燃焼：時間分割MULDICを提案した。これは、一段目の予混合燃焼を希薄化する一方、拡散燃焼の燃焼開始時期を遅延することにより、両者における局所温度を低減することを狙ったものである。

このコンセプトを実現するため、実験には噴射・混合気形成の自由度を高められる、1つのシリンダに3本（センタ1本、サイド2本）のインジェクタを持つ複数インジェクタシステムを用いた。一段目の予混合燃焼のための希薄混合気は、圧縮行程早期にサイドの2本のインジェクタから同時に全供給量の約半分の燃料を噴射し、着火までに十分な混合時間を与えることにより形成した。この希薄混合気を圧縮着火させた後の高温雰囲気下に、センタのインジェクタから再び燃料を噴射することにより、着火遅れ期間の極めて短い拡散燃焼主体の燃焼が実現でき、噴射時期の遅延が可能となった。この結果、燃焼領域の局所温度を低減することが可能となり、高負荷における NO_x を 100 ppm 以下に低減することができた。また、燃焼後期においてすすと酸素が混合しやす

い状態が形成されたため、同時にスモーク濃度の低減も実現した。

本燃焼方式では、全体の半分の燃料を予混合燃焼させているため、その燃焼時期が燃料消費率に大きく影響する。JIS #2 軽油では着火性が高すぎ、上死点よりかなり早い時期で燃焼が開始されるため、燃料消費率の悪化を招いた。しかし、着火性を抑えた軽油を使用し、予混合燃焼時期を上死点付近まで遅らせることにより燃料消費率は大きく改善し、従来型ディーゼル燃焼レベルの燃料消費率を維持しつつ、 NO_x とスモークを半分以下に低減することができた。しかし、 NO_x の低減には拡散燃焼時期の遅延が必要であるため、これ以上の NO_x 低減は等容度の低下を招き、燃料消費率を悪化させた。

そこで、拡散燃焼時期を遅らせることなく NO_x を低減するため、拡散燃焼用の噴射系の改善を試みたが、 NO_x に対する燃料消費率のトレードオフ関係は変わらなかった。このことから、拡散燃焼を行う限り、トレードオフ関係の改善は困難であることが示唆された。

次に、本方式の利点の一つである低スモーク特性を生かし、排気再循環 (EGR) との組合せを試みた結果、スモークの増加を抑えつつ NO_x を低減することができた。さらに、低負荷を希薄予混合燃焼で運転し、高負荷を本方式で運転した場合について、D13モード試験法により排出ガス値を測定した結果、従来のディーゼル燃焼に対して同等の燃料消費率を維持しつつ、 NO_x を $1/6$ まで低減することができた。しかし、それ以上の NO_x の低減には拡散燃焼の遅延が必要であるため、燃料消費率の悪化を招き、さらに大幅な NO_x 低減には拡散燃焼からの脱却が必要であることが確認された。

2. 層状混合気の圧縮着火燃焼（空間分割MULDIC）の排出物特性

上述のように、時間分割MULDICにより高負荷における NO_x の低減が可能となったが、さらに大幅な NO_x 低減には拡散燃焼の遅延が必要となり、燃料消費率が悪化した。また、その際 EGR により NO_x は低減できるが、拡散燃焼におけるスモークの増加を招いた。そこで、 NO_x と燃料消費率のトレードオフ関係を大幅に改善するには、拡散燃焼から脱却し上死点付近で短時間に燃焼を完結させつつ NO_x を低減しなければならない。しかし、混合気の均一化を進めた予混合圧縮着火燃焼では、負荷の増大により急激な燃焼によるノックを招くため、運転可能領域は部分負荷に限られることが報告されている。

そこで、ここでは、予混合圧縮着火燃焼で発生するノックを避けつつ、高負荷において予混合化の進んだ燃焼を可能とするため、新しいコンセプトの層状混合気の圧縮着火燃焼：空間分割MULDICを提案した。この方式は、混合気をノックしない程度の希薄混合気とすすが生成されない程度の過濃混合気とに空間的に分割することにより、ノックとスモークを抑制すると同時に、大量 EGR を行うことにより大幅な NO_x 低減を狙ったものである。

希薄混合気は全体の約半分の燃料を時間分割M U L D I Cと同じ早期燃料噴射や吸気管への気体燃料供給を行うことにより形成し、過濃混合気は圧縮行程後期（上死点付近）に残りの燃料を噴射することにより形成した。すなわち、二段階の燃料供給により希薄部と過濃部に空間的に分割された層状混合気を形成し、その後に圧縮自己着火により燃焼を開始させる方法をとった。このような方式についてエンジン試験を行った結果、二段目の燃料噴射後に適度な時間を与えた後に着火させ、30%程度のE G Rを行うことによって高負荷においてもノックを抑制しつつ、燃焼期間が短く等容度の高い燃焼を実現し、同時にスモークの増加を抑えつつ、N O xを大幅に低減することができた。

その燃焼特性について考察するために数値シミュレーションを行った結果、コンセプトどおり過濃部と希薄部に空間的に分割された層状混合気が形成されていることがわかった。さらに、均一混合気の試験結果からは過濃混合気においてもすすが生成されない条件が存在することが示され、燃焼観察結果からは極めて弱い輝炎のみが観察された。したがって、このような燃焼方式ではすすが生成するほど過濃な領域が少なく、スモークが抑えられたものと判断された。

これらの結果から、ノックを抑制しつつ燃焼期間が短く等容度の高い燃焼が実現できる理由として以下のことが考察される。燃焼初期において、希薄部は化学反応速度の低下、過濃部は発熱量の低下により発熱が抑制されるが、それ以降は未燃燃料と空気の混合が進んでいたため酸化が速く行われる。すなわち、層状化を進め混合気濃度分布を制御したため、理想的な熱発生率が得られたものと考えられる。

空間分割M U L D I Cの燃料消費率は、従来のディーゼル燃焼の最低レベルには到達していない。これは、早期に噴射した燃料がライナ壁面に付着することや、過濃部で生成したC OやH Cが酸化されずに排出され燃焼効率が低下するためである。しかし、従来のディーゼル燃焼において噴射時期の遅延によりN O xを低減した条件と比較すると、同等の燃料消費率とスモークでN O xを1/10に低減することができた。また、高い等容度が実現できるため、燃焼効率を従来のディーゼル燃焼レベルにまで改善することができれば、燃料消費率を従来のディーゼル燃焼の最低レベル以下に低減できる可能性がある。

以上のように、本研究では高負荷におけるN O xを大幅に低減するためには、拡散燃焼主体であるディーゼル燃焼から予混合化した燃焼方式に脱却することが有効であることを明らかにし、これを実現する方法として二つの燃焼方式を提案した。これらの新しい燃焼方式によってスモークや燃料消費率を犠牲にすることなく大幅なN O x低減が可能となった。実用化にあたっては、上述した問題を克服することによって高効率・低公害な次世代内燃機関の開発に寄与するものと考えられる。