

圧縮着火機関における希薄予混合燃焼特性に関する研究

学位論文内容の要旨

ディーゼルエンジンは熱効率などその優れた動力特性のために主として輸送を担う動力源として広範に利用されているが、PM、NO_xなどの排出ガスの低減対応が社会的急務である。これに対して最近、低NO_xかつ無煙燃焼法として希薄予混合圧縮着火燃焼法が注目されている。しかしその基本的な燃焼の特性あるいは機構が十分把握されておらず、また燃焼上の課題に対する対応技術も確立されていない。

本論文は、気筒内燃料噴射方式の希薄予混合圧縮着火機関において重要かつ基本となる着火・燃焼の特性と機構を解明すると共に、その制御法について検討と提案を行ったものである。

第1章は序論であって本研究の背景、関連の研究および研究の目的について述べた。

第2章では供試エンジン、実験装置と方法および解析方法について記述した。

第3章においてはエンジン実験を軸にして予混合圧縮着火燃焼の基本特性を解明すると共に、従来燃焼方式との差異を究明した。すなわち、予混合圧縮着火燃焼では燃料噴射時期の進角によりNO_x濃度の大幅な低減が可能であって、それは筒内での混合気の希薄化と均一化による局部燃焼ガス温度の低下に起因することを検証した。一方、従来燃焼に比べて未燃HC、COは増加し、正味燃費率が若干悪化する特性を示した。また予混合圧縮着火燃焼では従来燃焼に比較して、ピストン表面温度が低くその値は均一予混合圧縮着火燃焼(HCCI)の場合とほぼ同じであること、温度測定点による温度差が小さいことから燃焼室内での燃焼がほぼ同時進行していること、さらに燃焼室壁面への熱損失が少なく熱効率上から有利な面もあること等を明らかにした。

第4章では、予混合圧縮着火燃焼における更なる排出ガス低減を主眼として、特に燃料噴射系およびその関連因子が混合気形成に及ぼす影響について実験的に解明すると共に、混合気形成状態を噴霧観察とシミュレーションにより解析した結果について論述した。予混合圧縮着火燃焼は、噴霧の分散等による混合気形成状態の影響を大きく受けることを明らかにすると共に、ピントルタイプノズルの使用による噴霧分散制御によって排出物質濃度を大幅に低減し得ること、その低減は主として燃料壁面付着、および混合気濃度分布の改善に起因することを実証した。また燃焼室形状影響については従来燃焼の場合と同様に、噴霧形状に合った燃焼室形状の採用によって排出物濃度の改善が可能であることも併せて明らかにした。

予混合圧縮着火燃焼での燃費率悪化は、過早着火によるサイクル効率の低下と、燃料壁面付着と

に起因しており、後者による潤滑油中へ燃料混入量は従来燃焼方式に比較して多いものの、混合気形成法の改良によって大幅に低減できることも実証した。またこの燃焼法での PM 排出量増加は、未燃燃料分と潤滑油分とによる SOF 成分の増加に起因していること、ピストン壁面温度の上昇あるいはクレビスボリュームの減少により特に未燃燃料分の低減が可能であること等を明かにした。

第 5 章では圧縮着火現象および着火時期に対する影響因子について検討し、いくつかの方法による着火時期制御の可能性を提示した。低温酸化反応の開始時期は燃料のセタン価と筒内平均ガス温度に支配的され、高温酸化反応は筒内平均ガス温度に支配的されること、燃焼条件によって高温酸化反応の開始時期が変わるのは、低温酸化反応の開始時期が異なることに伴って、その後の高温酸化反応開始までの筒内ガス温度履歴が異なるためであることがわかった。またエタノールあるいは MTBE 等の低セタン価燃料を軽油に混合すること、あるいは軽油の早期噴射後に低セタン価燃料であるメタノール等を筒内噴射することによって着火時期の制御と燃費率の改善とが可能になることを実証した。メタノール噴射ではその蒸発潜熱に起因する筒内ガス温度の低下によって過早着火が抑制され、その噴射時期が早いほど圧縮行程中での筒内温度低下が大きく、着火時期が遅延することともわかった。また着火時期によって燃費率は大きく変化し、着火時期が早い場合の燃費率悪化は熱損失の増大に、また遅い場合は燃焼効率低下にそれぞれ起因することが判明した。

第 6 章においては、エンジン回転速度および負荷の安定運転領域の解明とその領域拡大の手法を提示した。すなわち、無過給での希薄予混合燃焼の安定運転領域は、従来の無過給燃焼法での低・中負荷域に限られ、また大型エンジンの実用回転である 2000rpm までの安定運転も可能であることを示した。この燃焼方式での運転領域拡大には燃料噴射量が増加した際の急激な圧力上昇を伴う過早着火の制御が重要であること、その制御に対して低圧縮比、EGR および過給の適用がいずれも有効であるが、特に過給の適用によって低 NOx 燃焼を維持しながら従来の無過給燃焼方式で得られる以上の図示平均有効圧力を確保し得ること等を示した。

第 7 章では、特に高過給時における予混合圧縮着火燃焼方式での機関性能、着火燃焼特性および排出物特性について解明すると共に、過給条件下における燃焼の可視化解析、および混合気形成に対するシミュレーション解析の結果について論述した。過給条件については、図示平均有効圧力によって燃費率が最適となる過給圧力と空気過剰率の条件が異なるため、過給圧力と空気過剰率の同時制御が必要であること、また高過給時に EGR を併用することによって、NOx 濃度を増加させることなく燃費率を改善し得ること等がわかった。また、低圧縮比の採用により、空気過剰率の小さい領域では冷却損失の減少によって燃費率の改善ができるが、その場合過給圧力を増加すると着火時期の早期化によって燃費率の改善効果は若干減少すること、CO 排出濃度は筒内平均ガス温度に概ね支配されるため、ガス温度が低いと CO 濃度は増加し、一方吐煙発生は主として燃料の燃焼室付着によるため、空気過剰率と燃料噴射量だけでなく燃料噴射時期にも支配されることを明らかにした。過給による着火時期の早期化は、空気量の増加に伴う低温酸化反応での熱発生量増加と燃焼室壁面温度上昇とに起因し、結果的に高温酸化反応の開始時期が早期化することを示した。過給時には、筒内密度の増加によって噴霧のペネトレーションが弱まり混合気の希薄化が抑制される

が、その際の噴射率増加が噴霧のペネトレーションあるいはそれによる希薄混合気形成をより促進することをシミュレーション解析からも検証した。

第8章は結論であって、本研究で得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 本 登
副 査 教 授 菱 沼 孝 夫
副 査 教 授 伊 藤 獻 一

学 位 論 文 題 名

圧縮着火機関における希薄予混合燃焼特性に関する研究

近年ディーゼルエンジンにおいては、超低 NO_x ・無煙燃焼法として希薄予混合圧縮着火燃焼法が注目されている。しかしその基本的な燃焼の特性あるいは機構は十分解明されておらず、また燃焼上の課題に対する対応技術も確立されていない現状である。

本論文は、気筒内燃料噴射方式の希薄予混合圧縮着火機関において重要かつ基本となる着火・燃焼の特性と機構を解明すると共に、その制御法についても検討を行ったものである。

第1章では、本研究の背景および目的について述べている。

第2章においては、実験装置と方法および解析方法を記述している。

第3章では、エンジン実験を軸にしてまず予混合圧縮着火燃焼の基本特性について解明を行っている。すなわち、予混合圧縮着火燃焼では燃料噴射時期の進角により NO_x と吐煙の低減が可能であって、前者は主に燃焼室内混合気の希薄化と均一化による局部燃焼ガス温度の低下に起因することを検証している。更にこの燃焼法では従来燃焼に比較して、燃焼室空間でのガス温度差が非常に小さく燃焼が燃焼室内でほぼ同時に進行していること、また燃焼室壁面への熱損失が少なく熱効率上から有利な一面があること等を示している。

一方、従来燃焼法に比べて未燃 HC、CO の排出量が増加し、正味燃費率は若干悪化する特性を有することを明らかにしている。

第4章では、予混合圧縮着火燃焼における更なる排出ガス低減を主眼として、燃料噴射系およびその関連因子が混合気形成に及ぼす影響について解明すると共に、混合気均一化のための実際的な手法を提案している。燃料噴射ノズルについては、特にピントル型の使用によって噴霧分散と混合気均一化が促進され排出物質濃度の大幅な低減が可能であることを実証している。燃焼室形状については従来燃焼の場合と同様に、噴霧形状に合った燃焼室形状の採用により排出物質濃度の改善が可能であることも併せて明らかにしている。

また、予混合圧縮着火燃焼における燃費率悪化要因は、過早着火によるサイクル効率の

低下と燃料壁面付着であって、特に後者に対しては混合気形成法の改良が重要であることを実証している。

第5章では着火時期の支配因子について検討すると共に、その制御の可能性を提示している。まず低温酸化反応の開始時期は主に燃料のセタン価と筒内ガス温度に、またそれに引き続く高温酸化反応はその後の筒内ガス温度経過のみにそれぞれ支配的されることを示し、例えば MTBE 等の低セタン価燃料を軽油に混合、あるいは筒内噴射することによって着火時期の制御と併せて燃費率の改善も可能であること等を実証している。

また着火時期と燃費率との関係について、着火時期が早い場合の燃費率悪化は熱損失の増大に、また遅い場合には燃焼効率低下にそれぞれ起因することを明らかにしている。

第6章においては、エンジン回転速度および負荷に関わる安定燃焼領域の解明とその領域拡大のための手法を検討している。すなわち、通常の希薄予混合燃焼での安定運転領域は、低・中負荷域と 2000rpm 程度までの回転域とに限定されること、その領域拡大に対しては燃料増量に伴う過早着火現象の制御が重要であって、低圧縮比、EGR および過給の適用がいずれも有効であること、特に過給によって低 NOx 化と高負荷燃焼を同時に確保し得ること等を明らかにしている。

第7章では、特に高過給時の予混合圧縮着火燃焼における機関性能、着火および排出ガスの特性解明とその改善を試みている。すなわち、過給時には燃費率が最適となる過給圧力と空気過剰率の条件が負荷状態によって異なるため、過給圧力と空気過剰率の同時制御が必要であること、高過給時に EGR の併用によって NOx 濃度を増加させることなく燃費率の改善が可能であること等を実証している。また低圧縮比の採用により過給時の燃費率改善が更に可能であるが、高過給時にはそれにとまなう着火時期の早期化により燃費率の改善効果が若干減少すること、この着火時期の早期化は、過給に伴う低温酸化反応での熱発生量増加と燃焼室壁面温度上昇とに起因する高温酸化反応の早期化によること等を見出している。一方、過給時には燃料噴霧のペネトレーション低下とそれによる混合気の希薄化抑制現象とが生ずることを見出すと共に、その抑制現象は特に燃料噴射率の増加により容易に改善し得ることを示唆している。

第8章では、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、希薄予混合圧縮着火燃焼の特性およびその改善手法に関して新知見を得たものであり、内燃機関工学および燃焼工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。