

学 位 論 文 題 名

高圧噴射および燃料性状の改善による
ディーゼルエンジンの排気浄化に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、自動車用ディーゼルエンジンにおいて、高圧噴射ならびに燃料性状の改善による排気有害成分の低減に関して、その改善の要因を明らかにして、今後の排気対策に関する一指針を与えることを目的としたものである。

第1章では、研究の目的および得られた成果の概要について述べるとともに、研究の背景ならびに関連する研究の動向についてとりまとめている。

第2章では、供試エンジンや実験に用いた装置、ならびに測定方法について記述した。

第3章では、高圧噴射による噴霧特性の変化を、運動量保存則を基にした一次元準定常理論により解析し、噴射圧力や噴口径などの噴射系諸元が到達距離や噴霧内の空気過剰率などに対して与える影響を明らかにした。噴射圧力の高圧化は、単位時間当たりの噴霧束への空気導入量を増加させるが、総空気導入量は噴口径により決まり噴射圧力には依存しない。また、高圧噴射は、噴霧の保有する運動量の増大と乱れの生成とを促すので、これによって燃料と空気の混合促進を期待することができる。このさい、燃料噴射のみによって燃料に必要な空気を噴霧内に導入するためには、噴口径を $\phi 0.18\text{mm}$ 以下に絞ることが必要であるが、噴射圧力を200 MPa 以上に高めても、噴射率は現行の噴射系におけるそれよりも低下するなどの事柄について明らかにした。

第4章では、高圧噴射が燃焼におよぼす影響について、試作した蓄圧式高圧噴射装置と、ピストンの底面に石英の窓を設けた可視化エンジンとを用いて解析した。まず始めに、シリンダ内圧力の熱力学的な解析を行い、噴射圧力や噴口径、あるいは燃焼方式が、着火遅れや燃焼期間に対しておよぼす影響について調べた。その結果、着火遅れは噴口径が小さくなるにしたがい短縮されるが、一方、噴射圧力が100 MPa 以上の高圧下においては、噴射圧力の増加にしたがい、逆に増大することが示された。また、噴射期間中に燃焼する燃料の割合は、噴口径の影響を強く受ける一方、噴射圧力によってはほとんど変化しない。そして、噴射圧力を上げると燃焼期間は短縮されるが、その場合、高圧化にともなう初期燃焼期間の短縮の寄与が大きいなど、燃焼の基本的な特性を明らかにした。

さらに、レーザシャドウグラフによる燃焼観察を行って、混合気形成や着火あるいは火炎の発達過程、ならびにすすの分布などを把握することを試みた。その結果、高圧噴射においては、着火位置が噴射ノズル近傍から燃焼室周壁付近に移動するために、噴霧内への主な空気導入部であるノズル近傍が火炎に包まれることがなくなり、新気の導入を阻害する要因の一つである既燃焼ガスの再導入が減少することが明らかになった。そして、小噴口ノズルと高圧噴射との組み合わせによれば、燃焼後期における火炎の消滅が早く、燃焼後期におけるすすの酸化促進の寄与が大きいことなどの燃焼改善の要因を明らかにした。

第5章では、 NO_x およびすす生成に関する重要な因子である火炎の温度分布を、画像解析を用いた二色法により測定して、噴口径や噴射圧力の影響について調べた。さらに、火炎温度とすす濃度の指標である KL 値とからすすの生成および酸化について考察した。すなわち、KL 値は火炎の先端付近で大きな値を示すこと、また、火炎内におけるその分布は不均一で、燃焼終了時においても KL 値の大きな火炎の塊が存在すること、さらに、同一噴射時期で噴射圧力を上げると火炎温度は高くなり、これが NO_x 増加の主要因と考えられること、また、高圧化による火炎温度の上昇には、急速な圧力上昇による断熱圧縮の影響が大きいこと、そして、KL 値は噴射圧力が高くなるに従って小さくなり、とくに、燃焼後期においてその差が著しいことなどを明らかにすることができた。すなわち高圧噴射には、すすの生成を抑制することに加え、燃焼後期の酸化を促進する効果があるが、燃焼後期におけるすすの消滅は温度の高い領域で著しく、火炎温度の上昇によるすすの酸化促進の効果が認められる。

第6章では、軽油の重質化が排気ガスやエンジン性能に対して与える影響について論述した。まず始めに、燃料性状と排気ガスの関係について実験的に調べた。さらに、噴霧粒径の測定ならびに噴射系の数値解析などを行い、軽油の重質化がエンジン性能および排気ガスに対しておよぼす影響について明らかにした。すなわち、軽油が重質化すると、全負荷運転時の噴射量が増加するが、噴射系の数値解析により、噴射量の増加は、重質化に伴って燃料の体積弾性率が大きくなることと、密度が増加することに起因することが示された。排気ガスに関しては、噴射量が増加するため、全負荷運転時における CO および吐煙が著しく増加する。また、低負荷においては、燃料の重質化に伴い噴霧のザウタ平均粒径が増加して、THC 増加の一因となることなどを明らかにすることができた。そして、これらの結果から、重質化した軽油は将来の低公害エンジンの燃料としてふさわしくないとの結論を得た。

第7章では、燃料の低硫黄化による粒子状物質の低減と、それによって可能となる EGR の適用による NO_x の低減とを目的として、軽油中の硫黄分が排気ガスおよび EGR 運転時におけるエンジンの磨耗に対しておよぼす影響について、実験的に調べた。すなわち、硫黄分が CO, T

HC, ならびに NO_x の排出特性におよぼす影響は少ないが, SO₂ は燃料中の硫黄含有量に比例して排出される。粒子状物質は, 硫黄分を下げると減少するが, これは, サルフェートとそれに結合している水分が減少することによるものである。硫黄分の高い軽油 (0.40 wt%) を用いて EGR 運転を行うと, ピストンリングおよびシリンダライナーの磨耗が増加するが, 軽油中の硫黄分を下げるにつれ, これらの磨耗量は少なくなる。そして, 硫黄分を現行の水準 (0.40 wt%) から 0.05 wt% 程度まで下げると, 磨耗量は, EGR を行わない場合とほとんど同じ水準まで減少する。これらの結果から, 軽油の低硫黄化は, 粒子状物質の低減と EGR の適用とを可能にし, 将来の低公害燃料として有望であるとの結論を得ている。

第 8 章では, 軽油中の芳香族成分が排気ガス, ならびに粒子状物質に対しておよぼす影響について, 直接噴射式 (以下 DI) とうず室式エンジン (以下 IDI) とを用いて実験的に調べた。その結果, DI エンジンにおける CO の排出量は, 芳香族割合とともに増加することが明らかになった。また, NO_x および粒子状物質は両エンジンとも, 芳香族割合とともに増加し, IDI エンジンでは芳香族割合の増加に比例してドライスートが, また, DI エンジンではドライスートおよび SOF の両方が増加することを示した。さらに, 粒子状物質への硫黄分と芳香族分との寄与について比較を行い, 硫黄分 0.2 wt% 当たりの粒子状物質の変化量は, IDI エンジンでは 7 %, DI エンジンでは 12% の芳香族の変化量に相当し, 芳香族分の低減は低硫黄化と同程度の排気ガス清浄化の効果が期待できることを明らかにした。

第 9 章は本研究の結論であり, 得られた成果の概要を記述した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	村 山	正
副 査	教 授	宮 本	登
副 査	教 授	伊 藤	献 一
副 査	教 授	寺 尾	日出男 (農学研究科)

本論文は, 自動車用ディーゼルエンジンの低公害化に関連したものであって, 高圧噴射および燃料性状の改善による有害排気成分の低減に関する改善要因を明らかにして, 今後の排気対策に関する一指針を与えることを目的としたものである。

高圧噴射による燃焼改善の要因解析においては, まず始めに, 高圧化による噴霧特性の変化を,

一次元準定常理論により解析して、噴射圧力や噴孔径などの噴射系諸元が噴霧内の空気過剰率などに対して与える影響を明らかにしている。すなわち、燃焼に必要な新気を噴霧内に導入して、燃料と空気との混合を促進するためには、噴射圧力の高圧化に加えて噴射ノズルの小噴孔径化が必要であるとの結論を得ている。

高圧噴射が燃焼におよぼす影響に関しては、試作した畜圧式高圧噴射装置と可視化エンジンとを用いて、燃焼の基本特性に与えるその影響について明らかにしている。そして、噴射圧力を上げると燃焼期間は短縮されるが、その場合、高圧化にともなう初期燃焼期間の短縮の寄与が大きいなど、燃焼の基本的な特性を把握している。

また、レーザシャドウグラフによる燃焼の観察によって、高圧噴射においては着火位置が噴射ノズル近傍から燃焼室周壁付近に移動するので、噴霧内への主な空気導入部であるノズル近傍が火炎に包まれることが少なく、新気の導入を阻害する一要因である既燃焼ガスの再導入が減少することなどを明らかにしている。

さらに、NO_x およびすす生成に関する重要な因子である火炎の温度分布を画像解析を用いた二色法により測定して、高圧噴射は火炎温度を上昇させ、これが NO_x 増加の主要因と考えられること、また、高圧化による火炎温度の上昇には、急速な圧力上昇による断熱圧縮の影響が大きいこと、そして、すす生成の指標である KL 値は噴射圧力が高くなるに従って小さくなり、とくに、燃焼後期においてその差が著しいことなどを明らかにしている。すなわち、高圧噴射には、すすの生成を抑制することに加えて、燃焼後期の酸化を促進する効果があることを示している。

燃料性状の改善による排気ガスの低減に関しては、我国に特有な石油事情を考慮に入れて、将来の低公害エンジン用の燃料についての指針を示しているが、まず始めに、軽油の重質化が排気ガスやエンジン性能に対して与える影響について調べ、以下の結論を得ている。すなわち、軽油が重質化すると噴射量が増加するが、噴射系の数値解析により、噴射量の増加は重質化に伴う燃料の体積弾性率と密度の増加に起因するものであることを明らかにしている。そして、排気ガスに関しては、噴射量の増加にともなって、CO および吐煙が著しく増加すること、また、低負荷においては、燃料噴霧のザウタ平均粒径の増加が THC 増加の一因となることなどを明らかにしている。そして、これらの結果から、重質化した軽油は将来の低公害エンジンの燃料としてふさわしくないとの結論を得ている。

つぎに、粒子状物質と EGR の適用による NO_x の低減を目的として、軽油中の硫黄分が排気ガス、および EGR 運転時におけるエンジンの磨耗に対しておよぼす影響について、一連の実験を行って明らかにしている。すなわち粒子状物質は、硫黄分の低減とともに減少するが、これは、サルフェートとそれに結合する水分が減少することによるものである。一方、硫黄分の高い

軽油（0.40 wt%）を用いて EGR 運転を行うと、ピストンリングおよびシリンダライナーの磨耗が増加するが、軽油中の硫黄分を0.05 wt%程度まで下げると、磨耗は EGR を行わない場合とほとんど同じ水準まで減少する。すなわち、軽油の低硫黄化は、粒子状物質の低減と EGR の適用とを可能にするので、将来の低公害燃料として有望であるとの結論を得ている。

最後に、軽油中の芳香族成分が排気ガスならびにエンジン性能に対しておよぼす影響について実験的に調べ、芳香族割合に比例して粒子状物質が増加することを明らかにしている。また、粒子状物質への硫黄分と芳香族分との寄与について比較を行い、硫黄分0.2 wt%当たりの粒子状物質の変化量は、IDI エンジンでは7%、DI エンジンでは12%の芳香族の変化量に相当し、芳香族分の低減は低硫黄化と同程度にその効果が期待できることなどを明らかにしている。

これを要するに本論文は、自動車用ディーゼルエンジンの排気ガス浄化に関して、今後の中心的な対策技術と考えられる高圧噴射と燃料性状の改善とによる有害排気成分の低減についての指針を示したものであって、内燃機関工学ならびに燃焼工学上寄与するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。