

予混合圧縮着火機関の燃料性状依存性に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、エネルギー問題や CO₂ 排出による地球温暖化問題が深刻化しているのに対し、この解決策として優れた熱効率を有するディーゼル機関に注目が集まっている。しかし、NO_x あるいは微粒子（PM）などに起因する大気汚染が社会問題にまで至っており、その対策が急務となっている。これに対し、無煙・低 NO_x 運転が可能である予混合圧縮着火（PCCI）燃焼が注目されている。PCCI 燃焼は、圧縮着火ではあるもののディーゼル機関とは燃焼形態が大きく異なるため、従来のディーゼル燃料とは燃料性状への要求が異なるものと考えられるが、それに対する検討はまだ十分には行なわれていない。

本研究は、早期直接噴射型の PCCI 機関において、燃焼・排気特性の蒸留特性および着火特性に対する依存性について実験および数値解析の両面から系統的な解析を行い、PCCI 機関に最適な燃料性状を提唱することを目的としている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、関連の研究動向、本研究の目的および得られた結果の概要について記述した。

第 2 章は本研究で用いた実験装置と方法、解析方法について記述した。

第 3 章は、燃料性状が PCCI 機関の混合気形成に与える影響について、シュリーレン噴霧画像および CFD による定容容器における基礎的な解析と、CFD によるエンジン筒内における混合気形成過程の解析を行なった結果について記述した。定容容器内のシュリーレン噴霧画像より、PCCI 機関における低温度・低圧力雰囲気中への燃料噴射の場合、従来のディーゼル機関での高温・高圧場の場合よりも燃料の蒸発性が噴霧形状に大きな影響を与えることが示唆された。すなわち、従来の軽油では、雰囲気温度・圧力の低下とともに噴霧の到達距離が大きく増加するとともに噴霧の半径方向の広がりも縮小し、燃料の蒸発が大きく悪化してピストンやシリンダライナ壁面への燃料付着が懸念されるのに対し、蒸発性の高いノルマルヘキサンでは雰囲気温度・圧力が噴霧形状に与える影響が少なくなるため、PCCI 機関での低温度・低圧力雰囲気中への燃料噴射においても良好な混合気形成が得られる可能性が強いことを示した。

また、供試エンジンと同一形状の燃焼室メッシュを作成し、CFD によるエンジン筒内混合気分布の形成過程について解析を行なった。PCCI 機関では、低温度・低圧力雰囲気中への燃料噴射となるため、軽油の場合、燃料噴射直後の蒸発が大きく悪化し、

そのため混合気の均一性が低下することがわかった。これに対しノルマルヘプタンなどの蒸発性の高い燃料を用いることにより、燃料噴射直後の蒸発の改善が可能であり、燃料蒸留温度の低下が均一希薄混合気の形成に有効であることが示された。

第4章は、供試エンジンを用いて燃料の蒸留特性に対するPCCI機関の燃焼および排気特性を明らかにするとともに、蒸発性の高い燃料を用いることによるPCCI機関の排気エミッションおよび熱効率の改善効果について記述した。CFD解析で得られた結果と同様に、燃料噴射時期を進角しピストンキャビティの外に燃料噴射が行なわれた場合に、燃料蒸発性が機関性能に大きな影響を与えることが実験結果からも実証された。また、燃料の蒸発性により燃焼室内の混合気分布が大きく変化するため、その結果としてPCCI機関の着火特性にも影響を与えることがわかった。

蒸発性の高い燃料を用いた機関性能とエミッション改善効果については、燃料噴射時期進角時の熱効率改善が可能であり、その理由として潤滑油に混入する燃料を低減し得るためであることを潤滑油の分析により示した。

第5章は、燃料の着火性に関して、圧縮比やEGRなどの諸因子も含めて化学動力学的解析および実験の両面から系統的に解析し、PCCI燃焼の燃料着火性および圧縮比に対する依存性について記述した。燃料着火性、圧縮比およびEGRのいずれもPCCIの過早着火の抑制に有効であることは知られているが、本研究により低温酸化反応の発熱量や着火温度に与える影響など、着火抑制の機構はそれぞれ異なることがわかった。

燃料着火性、圧縮比、EGRに対する熱効率・排気特性についても検証を行なった。特に熱効率に関しては、理論熱効率、発熱の等容度、燃焼効率および冷却損失をそれぞれ算出し詳細に解析することで、燃料着火性と圧縮比のPCCI機関への適合性の検討を行なった。安定した着火が得られる範囲においては、圧縮比を低下した場合、理論熱効率と燃焼効率が悪化するが、それ以上に等容度の向上と冷却損失の改善が得られるため、図示熱効率が向上することがわかった。燃料着火性に対しては、熱効率が最大となる圧縮比に設定した場合で比較すると、各燃料着火性に対し図示熱効率はほぼ同一となることがわかり、熱効率が最大となるように燃料着火性と圧縮比の組合せを選択することが重要であることが示唆された。また、EGRは燃焼効率を悪化させることなく過早着火を抑制することが可能であるとともに、冷却損失の低減に対しても非常に有効であるため、安定した運転が得られる範囲内でEGRを最大限に適用することにより熱効率の向上が可能であることを示した。

第6章は結論であり、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 小 川 英 之
副 査 教 授 近 久 武 美
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

予混合圧縮着火機関の燃料性状依存性に関する研究

近年、化石燃料の枯渇によるエネルギー問題や CO₂ 排出による地球温暖化問題が深刻化しているのに対し、この解決策として優れた熱効率を有するディーゼル機関に注目が集まっている。しかし、NO_x あるいは微粒子 (PM) などに起因する大気汚染が社会問題にまで至っており、その対策が急務となっている。これに対し、無煙・低 NO_x 運転が可能である予混合圧縮着火 (PCCI) 燃焼が注目されている。PCCI 燃焼は、圧縮着火ではあるもののディーゼル機関とは着火および燃焼形態が大きく異なるため、従来のディーゼル燃料である軽油とは燃料性状への要求が異なるものと考えられる。また、石油資源に代わる次世代のエネルギー源を検討する際にも、高効率でクリーンな燃焼を同時に実現しうる PCCI 機関の最適燃料性状を提唱することは非常に重要であるが、それに対する検討はまだほとんど行なわれていない。

本論文は、早期直接噴射型の PCCI 機関において、燃焼・排気特性の蒸留特性および着火特性に対する依存性について実験および数値解析の両面から系統的な解析を行い、PCCI 機関に最適な燃料性状を提唱することを目的としている。本論文で得られた結果は以下のように要約できる。

- (1) PCCI 機関の燃料噴射時におけるシリンダ内雰囲気を想定した定容容器内での噴霧の可視化解析において、燃料の蒸発性の向上にともない噴霧の到達距離が短縮することが確認され、燃料の蒸発性向上により PCCI 機関における燃料の壁面付着を低減できる可能性が示唆された。また、CFD によるエンジン筒内における混合気形成過程の解析を行なった結果、早期噴射された燃料は、蒸発性が低いほど初期の蒸発が遅れ、燃焼室キャビティ外に早期噴射された噴霧がピストンスキッシュ部に滞留するのに対し、燃料蒸発性の向上によりこれを解消できることが予測できた。一方、キャビティ内に噴射された場合には上死点付近の混合気濃度分布に及ぼす蒸留温度の影響は比較的小さいことが示された。

- (2) 供試機関を用いた実験において、軽油のような蒸発性の低い燃料の場合、燃料噴射時期の進角にともない図示熱効率が大幅に悪化した。この要因として、噴射時期進角時は燃焼室キャビティ外に噴射される燃料が増加し、シリンダライナー壁面付着に伴う潤滑油内への燃料混入量が増加してしまうことが挙げられる。このため、蒸発性の低い燃料では、燃料噴霧が燃焼室キャビティ内に噴射されるように、噴霧間角度の狭角化や燃焼室の大口径浅皿化などの対策が必要となる。一方、PCCI 機関は高負荷への適用が難しいことから、実用化にあたっては二段噴射型の部分予混合燃焼、または低～中負荷のみ PCCI 燃焼を行なう機関が検討されており、これを考慮すると PCCI 燃焼のみに特化した噴射ノズルや燃焼室形状に設計することは実用上困難といえる。これに対し、燃料の蒸発性向上により従来の噴射ノズルや燃焼室においても潤滑油内への燃料混入を低減でき、噴射時期進角時における図示熱効率の改善が可能となることを示した。以上より、燃料の蒸発性が PCCI 機関の性能に及ぼす影響は非常に大きく、より蒸発性の高い燃料が要求されることが明らかとなった。
- (3) 燃料着火性については、低着火性の燃料を用いた場合、高着火性燃料の場合よりも圧縮比を高く設定できるため理論熱効率の向上が得られるが、冷却損失の増加、燃焼効率の悪化により相殺されるため、結果として図示熱効率に与える影響は小さくなった。すなわち、圧縮比および EGR 率を熱効率が最大となるように設定することで、燃料着火性にかかわらず図示熱効率はほとんど同等となることを示した。以上より、PCCI 機関の燃料着火性に対する要求はさほど大きくはなく、圧縮比および EGR 率の最適化により広範な着火性の燃料に適応できる可能性があることを明らかにした。

これを要するに、著者は、これまで体系的な検討がなされていなかった PCCI 機関の燃料性状依存性について、主として燃料の蒸発性と着火性に対する系統的な検討結果を基に、PCCI 機関における最適燃料性状を明らかにしている。これにより、PCCI 機関の性能向上に大きく寄与するのみならず、PCCI 機関からの燃料性状への要求が提示されたことにより、将来の代替燃料の開発においても一つの指針となることが期待され、環境・エネルギー問題に対し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があるものと認める。