

# 博士論文審査報告書(案)

## 論 文 題 目

バイオディーゼルを用いた  
ディーゼル機関の燃焼・排出ガス特性に  
関する研究

A Study on Effects of Biodiesel  
on Diesel Engine Combustion and  
Emissions Characteristics

申 請 者

崔	暁丹
XIAODAN	CUI

環境・エネルギー研究科 環境・モビリティ研究

2014年2月

地球温暖化や石油系燃料の供給不足が懸念されるなか、脂肪酸メチルエステルを主成分とするバイオディーゼル（BDF）はディーゼル車の代替燃料として実用化されつつあり、CO<sub>2</sub> 排出量の抑制対策として有効とされている。そこで本研究では、食糧との競合が回避できるジャトロファから製造される BDF の実用化を想定して、ディーゼル機関においてこれを軽油に混合として利用した際の燃焼特性と排出ガス特性に及ぼす影響を調査したものである。研究に当たっては、エンジン実験と数値シミュレーションモデルによってそれらの特性を解明し、燃費と排出ガス対策を考慮した上で、PDF を有効利用するための具体的なエンジン制御の指針を得ることを目的としている。本論文は以下の 5 章から構成される。

第 1 章では、研究の背景と関連する従来の研究について説明し、それらの問題点を指摘した上で、研究の目的と概要について述べている。従来から行われて来た BDF の研究では、研究用エンジンで行われている例が多く、実際の排出ガス対策を講じるためには量産化された実用エンジンにおける研究が必要とされている。また、BDF による NO<sub>x</sub> の排出特性に関しては多く研究されているが、粒子状物質（PM）の排出量のみならず、粒子の個数や径に関する詳細な調査は極めて少ないのが現状である。そこで本研究では、実用化されている多シリンダ機関を対象に、実際に使用される運転条件における燃焼特性を解明し、有効な排出ガス対策の指針を得ることを目的としている。

BDF 混合燃料を用いた際の具体的な対策としては、多量の冷却排気再循環（Cooled EGR）、パイロット噴射、高圧噴射、予混合圧縮着火（Premixed Charge Compression Ignition: PCCI）燃焼などを対象としている。その効果を実験的に調査するとともに数値シミュレーションコードを適用して、BDF の燃焼に関わる素反応を構築し、その燃焼・排出ガス特性を解析して、低減対策に役立てることとしている。

第 2 章では、本研究において使用した乗用車用 4 気筒ディーゼル機関の諸元と実験装置を示し、エンジン実験の方法と運転条件の選定について説明している。また、本研究の対象とする軽油と BDF の性状分析を行い、両者の違いを明確にしている。さらに、BDF の噴霧特性を把握するため、定容容器を用いて高温高圧場を再現し、高速度ビデオカメラによる噴霧挙動の撮影法について述べている。最後に、本研究で数値解析に用いる 0 次元化学反応モデルと三次元熱流体コードの概要と噴霧・燃焼モデルについて説明している。

第 3 章では、エンジン実験において、BDF の燃焼特性の解明と実際の走行での燃焼・排出ガス特性を調査するため、日欧米の実走行モードにおいて使用頻度が高い運転条件を選定し、供試エンジンが搭載されている市販車のエンジン制御設定条件をベースとし、燃料の質量燃焼割合 50%（MFB50）の位置がベース条件と

一致するように噴射時期を調整し、トルク一定法によって測定を行っている。この方法により、Cooled EGR、多段噴射、高圧噴射、PCCI 燃焼において、BDF の使用による燃焼特性と排出ガス特性に与える影響を実験的に調査している。

その結果、標準軽油 (D100)、含酸素燃料 (ジェットロファ由来の BDF を 40% 混合した J40、その主成分であるオレイン酸メチルを 40% 混合した MO40、オレイン酸メチル 100% の MO100) において、ディーゼルエンジンの同等の制御条件での運転が可能であることを示している。また、パイロット噴射により燃焼が促進され、幅広い運転領域において、NO<sub>x</sub> の排出量を維持しながら Soot の排出量の大幅な低減が可能であることを確認している。

次に、高圧噴射によっていずれの燃料も Soot の排出量を大幅に低減し得る反面、NO<sub>x</sub> が増加し、含酸素燃料では D100 よりも NO<sub>x</sub> と未燃成分が増加する傾向となり、燃費の悪化が生じることを見出している。しかしながら、多量の Cooled EGR を適用することにより、Soot の排出を抑えながら D100 以上に NO<sub>x</sub> の低減が可能であることを明らかにしている。また、D100 よりも未燃成分の排出が低減し、燃費の改善も同時に実現できることを確認している。

さらに、含酸素燃料では、PCCI 燃焼によって NO<sub>x</sub> の排出を一定としながら、Soot の排出の大幅な低減が可能であり、同時に噴射圧を下げることで排出ガス低減と燃費と騒音の改善にも効果があることを確認している。

以上より、量産型ディーゼル機関に対して BDF を高い混合率で利用することが可能であり、高い EGR 率と低噴射圧の条件に設定することで、軽油に比べて燃焼を改善し、排出ガスが低減できる上、PCCI 燃焼の実現も可能となることが明らかにしている。

また、定容容器における高温高圧場において BDF の非定常噴霧の挙動を高速度ビデオカメラで撮影し解析している。その結果、含酸素燃料の使用により、D100 に比べて噴霧到達距離が長くなり、低噴射圧では噴射速度が増加する一方、高圧噴射においては D100 とほぼ同等の噴霧特性となることを明らかにしている。

第 4 章では、まず、BDF の燃焼反応モデルを用いて、0 次元の化学詳細反応コードにより、シリンダ内の温度、圧力、化学種濃度等が均一であると仮定して BDF と軽油の混合気による詳細な化学反応モデルを用いた燃焼反応計算を行っている。これによって各燃料の燃焼特性および排出ガス特性を詳しく調査した結果、含酸素燃料では D100 に比べて低温領域での着火遅れが著しく短くなり、低温での燃焼が促進することを確認している。また、MO では D100 よりも高い温度領域で Soot が生成し、MO40 においては、Soot が 2 つの温度領域で生成する傾向が認められたが、燃料の種類によらず NO<sub>x</sub> の生成領域はほとんど変わらないことを明らかにしている。

次に、軽油をベースとして開発した<sup>1</sup> 2 モデルに対して、BDF の噴霧観察の結

果をもとに修正を行い，BDF に使用可能な噴霧モデルを構築している．その際，燃料噴霧の可視化実験により，900 K の高温条件を中心として分裂モデル定数を決定している，これにより，燃料噴射期間中に燃料の供給と蒸発が平衡に達した期間での噴霧先端到達距離について検討し，各燃料における噴射圧に対する傾向を再現することを可能にしている．

さらに，三次元の数値流体シミュレーションにより BDF の燃焼・排出ガス特性を解析し，現象論的 Soot モデルを用いてエンジン筒内の Soot の生成と酸化のメカニズムを解明している．また，その排出を低減するために求められる混合気形成過程と燃焼温度について考察し，各燃料において燃焼圧力，熱発生率および Soot の排出量は計算値と実験値にほぼ一致し，モデルの予測精度を検証している．

以上より，MO を使用することでパイロット噴射により燃焼が促進され，MO の混合率が增加とともに Soot の排出量が減少する傾向を説明している．また，各燃料において最高燃焼温度の差がわずかなことから，NO<sub>x</sub> の排出には大きな差がないとしている．Soot はピストンキャビティ部分で生成し，流動により移送される挙動については燃料の違いによる差はほとんどないことを確認している．

以上の計算結果より，BDF を使用した場合の Soot の低減メカニズムを解明し，その際 NO<sub>x</sub> の排出を同時に抑制できることを確認して，BDF による排出ガス対策の有効性を理論面からも明示している．

第 5 章では，実験と理論から得られた成果を要約している．すなわち，BDF を用いたディーゼル機関の燃焼・排出ガス特性を対象に，実験的に詳しく調査した結果，それらの特性を予測する数値計算モデルによって得られた結果，および燃費の改善と排出ガス低減方策としての有用性についてまとめている．さらに，今後に残された課題や研究の発展性について述べている．

以上，要するに本論文は，BDF のディーゼル車用代替燃料としての有用性を実験と理論の両面から明示したものであり，エンジン燃焼工学の発展に寄与し，とりわけ代替燃料の利用技術や排出ガス対策技術の開発に資する論文として高く評価される．よって，博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める．

2014 年 2 月

審査委員	主査	早稲田大学教授		大聖	泰弘
		早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	勝田	正文
		早稲田大学教授	博士(工学)早稲田大学	草鹿	仁