

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

# 博士論文概要書

## 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

曉丹

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

地球温暖化や燃料枯渇の問題が深刻化しており，バイオディーゼル（BDF）はディーゼルエンジンの代替燃料として実用可能であり，CO<sub>2</sub> 排出量の抑制対策として，有効とされている．本研究においてはジャトロファから作られた BDF 燃料は軽油の代替燃料として，実用化されることを想定して，ディーゼルエンジンの燃料特性と排出ガスの特性に及ぼす影響を実験により調査し，さらに，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，排出ガス対策を考慮して BDF 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する．本論文は以下の 5 章で構成される．

第 1 章では，研究の背景と従来研究ならびに問題点を述べた後で，研究の目的を示した．従来研究においては，BDF の研究が多くされているが，主な研究はリサーチエンジンにおいて行っている．実用化に当たって量産化されたエンジンにおいての研究が必要とされている．また，BDF の使用により NO<sub>x</sub> の生成に対して多く研究されているが，Soot に対して極めて少ない．前述のように，Soot の排出量だけではなく，排出された粒子の数およびサイズも重要であるため，それに対しての研究が重要である．そして，多量 Cooled EGR の応用，多段噴射，高圧噴射および PCCI 燃焼などのディーゼル燃焼改善における研究はまだ軽油のみとなっている．それらの技術は BDF への応用の可能性を検討する必要がある．従来の数値シミュレーションコードにおいては，軽油をベースとして開発されたものが多く，ほかの燃料の利用に対してまだ検証されていない．BDF の素反応の構築が検討されていたが，CFD コードへの応用がまだ検討されていない．また，BDF の燃焼特性および排出ガス特性の解析に対する研究は非常に少ないことが事実である．したがって，本研究においては，BDF の実用化を想定し，実験的に，市販車用の量産型ディーゼルエンジンを対象に，パイロット噴射，高圧噴射，EGR および PCCI 燃焼における燃焼・排出ガス特性に及ぼす影響を調査し，エンジンの実走行に当たって最適条件を検討する．また，0 次元での BDF の燃焼反応モデルを用いて，その反応特性が燃焼および排出ガスに与える影響を解明し，実験に得られた最適条件の本質を明らかにする．さらに，3 次元 CFD コードにて，BDF の噴霧・燃焼・排出ガスモデルを検証し，BDF の混合およびエンジン運転の最適条件を算出する．

第 2 章では，本研究における供試機関の諸元と実験装置を示し，エンジン実験の方法について述べた．さらに本研究において実験，解析対象とする運転条件の選定について検討した．その上，定容容器を用いて，燃料の噴霧測定について述べた．次に，本研究で数値解析に用いる 0 次元化学反応モデルおよび 3 次元熱流体コードの概要と噴霧・燃焼モデルについて述べた．また，本研究の

対象とする BDF についての分析および軽油との燃料性状の比較を行い、燃料の特性などについて述べた。

第 3 章では、実験においては、BDF の燃焼特性の解明と実走行での利用の両面から、日欧米実走行モードにおいて使用頻度が高い運転条件を用いて、量産エンジンが搭載されている市販車の ECU 設定値を元に設定した条件をベース条件とし、燃料の燃焼質量割合 50% (MFB50) の位置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い、Cooled EGR, 多段噴射, 高圧噴射および予混合圧縮着火 (Premixed Charge Compression Ignition: PCCI) 燃焼において、BDF の使用による燃焼特性および排出ガス特性に与える影響を実験的に調査した。

含酸素燃料 (J40, MO40 と MO100) において、全運転においてのディーゼルエンジンの一般設計と同等な条件での運転が可能であり、パイロット噴射による燃焼を促進でき、全領域において、NO<sub>x</sub> の排出量を維持しながら Soot の排出量を大幅低減が可能となっている。高圧噴射により、両燃料ともに Soot の排出量が大幅に減る一方、NO<sub>x</sub> の排出量が増加してしまい、含酸素燃料において、D100 より、NO<sub>x</sub> の排出量がさらに増加することが分かった。両燃料ともに未燃成分が増加する傾向となり、燃費の悪化が見られる。含酸素燃料において、D100 と比べ、多量 Cooled EGR の使用により、Soot の排出を抑えながら NO<sub>x</sub> の低減が可能となっている。そして、D100 より燃焼効率が向上しているため、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が分かった。含酸素燃料においては、PCCI 燃焼により、NO<sub>x</sub> の排出を維持するとともに、Soot の排出の大幅低減が実現でき、噴射圧が下がることにより排出ガス低減および燃費・騒音の改善に効果的であることが分かった。

高 BDF 混合率において、量産型ディーゼルエンジンへの応用が可能となり、高 EGR 率および低噴射圧の条件にすることで軽油より燃焼の改善ができ、排出ガスが低減できる。また PCCI 燃焼の実現も可能となっていることが分かった。

また、定容容器を用いて高速ビデオカメラにより、BDF の使用において燃料噴霧を撮影し、含酸素燃料の噴霧特性を調査した。その結果、含酸素燃料の使用により、すべての条件において噴霧到達距離が長くなり、低噴射圧において推定噴射速度が速くなり、高圧噴射において D100 とほぼ同等であることが分かった。

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を用いて、シリンダ内の温度、圧力、化学種濃度等は均一であると仮定し、BDF および軽油に対して、CHEMKIN-PRO により、燃焼反応計算を行い、

各燃料の燃焼特性および排出ガス特性を解明した。含酸素燃料が D100 より、低温領域での着火遅れが著しく短くなり、低温での燃焼を促進することを推定できる。MO の場合、D100 により、Soot がより高い温度領域で生成し、MO40 においては、Soot が 2 つの領域で生成する。また、燃料の種類によらず NO<sub>x</sub> の生成領域がほとんど変化しない。

また、軽油をベースとして開発した噴霧モデルを用いて、BDF の噴霧観察の結果により検証し、BDF に使用できる噴霧モデルを構築し、燃料噴霧の可視化実験により、温度 900 K の高温条件を中心として分裂モデル定数を決定した。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が再現できた。

さらに、3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 の生成および酸化のメカニズムを解析し、その排出を低減するために求められる混合気形成過程、燃焼温度について考察した。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がほぼ同等であり、MO の使用により、パイロット噴射による燃焼が促進され、MO の混合率が増加とともに Soot の排出量が減少する実験と同様な傾向が得られた。また、各燃料において最高燃焼温度の差がほぼなかったことにより、NO<sub>x</sub> の排出がほぼ差がなかった。Soot 生成の筒内分布により、Soot はピストンおよびボアのキャビティ部分から生成し、スキッシュ流れによりシリンダ内の中心側に移動し、燃料の違いによる差がほぼなかった。

以上の計算結果より、BDF の使用により Soot の低減メカニズムを解明でき、また NO<sub>x</sub> の排出が増加しないことも確認できた。

第 5 章では、バイオディーゼルを用いたディーゼル機関の燃焼と排出ガス特性について、実験的に調査し、数値解析により得られた知見を要約し、今後の課題や研究の発展性ととも結論を述べた。BDF の曇り点が高く、酸化安定性などの問題および生産コストの問題により、実用するために解決しなければならない問題である。燃料噴霧の蒸気層の観察が実現できなく、BDF の噴霧の蒸発特性の検討ができず、噴霧の蒸発モデルの検証ができなかった。また、KIVA-3V コードにおいて、単成分燃料による計算コードとなっているため、混合燃料において簡単に理想混合状態と仮定し、混合燃料の二体相互作用を無視し、モデルを改良したが、多成分の燃料混合が難しくなり、BDF のすべての成分がモデルにすることが求められ、今後、多成分燃料の使用が可能である KIVA-4 コードを導入し、計算を行う必要がある。

BDF はセタン価向上剤としての応用が可能となっていることが分かった。しかしながら、一般的にセタン価向上剤は少量で着火遅れの短縮効果を発揮できるものである一方 BDF において 40%まで混合し、効果が得られた。少量の BDF においてセタン価向上できるかどうかは解明する必要がある。

## 早稲田大学 博士（工学・学術） 学位申請 研究業績書

[査読論文、論文・口頭発表、著書、その他の分類別・年代の新しい順に記入してください]

氏 名 崔 曉丹 印

( 2013年 9月 現在)

分 類	著者(申請者含む)、 題名、 発行掲載誌名/発表場所・巻号・頁、 発行/発表年月
査読論文	<p>○Xiaodan Cui, Peng Lu, Hiroki Nakamura, Mitsuhiro Matsunaga, Akira Kikusato, Jin Kusaka and Yasuhiro Daisho, "Utilizing FAME as a Cetane Number Improver for a Light-duty Diesel Engine", SAE International, 2014-01-1392</p> <p>○Xiaodan Cui, Beini Zhou, Mitsuhiro Matsunaga, Yusuke Fujii, Jin Kusaka and Yasuhiro Daisho, "A Numerical Study on the Effects of FAME Blends on Diesel Combustion and Emissions Characteristics Using a 3-D CFD Code Combined with Detailed Kinetics and Phenomenological Soot Formation Models", SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013年11月, 2013-01-2689</p> <p>○崔曉丹, 金 兌根, 藤井 祐介, 草鹿 仁, 大聖泰弘, "バイオディーゼルを用いたディーゼル機関の燃焼と排出ガス特性に関する研究 -詳細な燃焼と反応解析", 自動車技術会論文集 Vol.44, No.2, P311~318, 2013年3月</p> <p>○Xiaodan Cui, Teagun Kim, Yusuke Fujii, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Manida Tongroon and Nuwong Chollacoop, "The Effects of Jatropha-derived Biodiesel on Diesel Engine Combustion and Emission Characteristics", SAE International, 2012-01-1637</p> <p>久留裕貴, 大久保拓哉, ○崔曉丹, 松本康義, 藤田翔平, 大聖泰弘, 大橋敏宏, 高橋徹, "バイオディーゼル燃料が乗用車用ディーゼル機関の性能と排出ガスに及ぼす影響", 自動車技術会論文集 Vol.42, No.2, P527~532, 2011年3月</p>
論文・口頭発表	<p>○Xiaodan Cui, Peng Lu, Hiroki Nakamura, Mitsuhiro Matsunaga, Akira Kikusato, Jin Kusaka and Yasuhiro Daisho, "Utilizing FAME as a Cetane Number Improver for a Light-duty Diesel Engine", SAE 2014 World Congress &amp; Exhibition, Detroit, Michigan, USA, April 09, 2014</p> <p>○Xiaodan Cui, Beini Zhou, Mitsuhiro Matsunaga, Yusuke Fujii, Jin Kusaka and Yasuhiro Daisho, "A Numerical Study on the Effects of FAME Blends on Diesel Combustion and Emissions Characteristics Using a 3-D CFD Code Combined with Detailed Kinetics and Phenomenological Soot Formation Models", SAE 2013 International Powertrains, Fuels &amp; Lubricants Meeting, Seoul, Korea, October 23, 2013</p> <p>○崔曉丹, 金 兌根, 藤井 祐介, 草鹿 仁, 大聖泰弘, "バイオディーゼルを用いたディーゼル機関の燃焼と排出ガス特性に関する研究 -詳細な燃焼と反応解析", 自動車技術会2012年秋季大会, 大阪, 2012年10月03日</p> <p>○Xiaodan Cui, Teagun Kim, Yusuke Fujii, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Manida Tongroon and Nuwong Chollacoop, "The Effects of Jatropha-derived Biodiesel on Diesel Engine Combustion and Emission Characteristics", SAE 2012 International Powertrains, Fuels &amp; Lubricants Meeting, Malmo, Sweden, September 19, 2012</p>

○Xiaodan Cui and Yasuhiro Daisho, “The Effect of In-cylinder EGR Gas Stratification on Diesel Emissions”, Young Researcher Workshop on Automotive Energy and Environment, Bangkok, Thailand, 2012年2月15日

○崔曉丹, 清松聖統, 藤間浩平, 久留裕貴, 大聖泰弘, “バイオディーゼルを用いたディーゼル機関の燃焼と排出ガス特性に関する研究”, 自動車技術会 2011年秋季大会, 北海道, 2011年10月13日

松本康義, ○崔曉丹, 西尾唯, 村田豊, 大聖泰弘, 香林丈治, 木村富雄, “ディーゼル機関における筒内 EGR ガス成層が排気に及ぼす影響”, 第 20 回内燃機関シンポジウム, 早稲田大学, 2009年9月1日