

# オットー式灯油機関を用いた廃食油バイオ燃料活用への基礎研究

A study on a utilization of Waste food oil base Biofuel using Otto kerosene engine

小林 茂己<sup>1)</sup>, 山田 裕一<sup>1)</sup>, 宇田川 真介<sup>1)</sup>, 豊島 雅幸<sup>2)</sup>

Shigemi Kobayashi<sup>1)</sup>, Hirokazu Yamada<sup>1)</sup>, Shinsuke Udagawa<sup>1)</sup>, Masayuki Toyoshima<sup>2)</sup>

**Abstract** : Although the application of Biofuel to engines is regarded as one of the effective approach to reduce heat-trapping gas emission toward the society based on recycling. BDF: Bio Diesel fuel, which is one of promising Biofuel is not widely used as expected for a reason of delicate fuel injection system of recent Diesel engines. For the growing use of BDF, the application to Otto engine is thought as one of the possibilities although increasing knock will occur in case of conventional Otto engines. However, the engine in this study is Otto engine tuned as kerosene fuel can be used i.e., Otto kerosene engine. And kerosene falls under an intermediate category between gasoline and Diesel fuel, therefor the tested engine has possibility to be operated with Bio Diesel fuel or kerosene mixed Bio Diesel fuel despite it is still Otto engine. And feasibility study to enlarge the range in application of BDF to Otto engine has been made. And several possibilities will be reported to use the BDF to the Otto kerosene engine with data such as indicated work in each cycle, pressure histories in cylinder and visualized picture images recorded by High-speed camera.

**Keywords** : Heat-trapping gas emission, Otto kerosene engine, Bio Diesel fuel, Waste food oil base Biofuel

## 1. はじめに

2008年の洞爺湖サミットにおいて気候変動問題を背景とした持続可能なバイオ燃料の生産と使用の重要性が強調されて[1]以来、カーボンニュートラル化への取り組みが官民を挙げて進められてきた[2]～[6]。カーボンニュートラルは温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出量を、燃料となる植物油の生産時に吸収されるCO<sub>2</sub>量によって相殺する循環型社会を目指した温暖化防止の取り組みである。例として、ガソリンを燃料とするオットー機関ではアルコール燃料への転換、又は部分的混合による温室効果ガス削減の取り組みが世界的に実行されている[7]。

将来に期待される水素社会[8]が実現するまでの間は、エネルギー源となる様々な燃料が共存し、それぞれに適した動力源が存在していくと考えられる。このような過渡期においても温室効果を抑えながら様々な燃料をバランス良く有効利用してゆくことがエネルギー需給の観点からも必要と考えられる。著者らは、こうした要求に対応した新たな動力用機関を検討するため、引火点が高く安全性の高い灯油系燃料をオットー機関に適用する基礎的研究[9]に着手し、ガソリンを燃料に用いた場合と比較を行ってきた。

現在、輸送機械の主要な動力源として用いられるピストン機関は、ガソリンを用いるオットー機関、及び軽油を用

いるディーゼル機関の二つである。オットー機関では燃料と空気を予め混合してから火花で着火(予混合燃焼)させるため自着火性の低いガソリンを用いる。他方、ディーゼル機関では圧縮して高温にした空気中に燃料を噴霧して燃焼(圧縮着火燃焼)させるため、自着火性の高い軽油を用いる。

先の著者らの研究[9]はオットー機関にガソリンと軽油の中間的性質を有した灯油を適用したものであり、従来研究には灯油よりもさらに軽油に近いBDFをオットー機関に適用した例は見当たらない。本研究は先の研究[9]に用いたオットー式灯油機関にBDFの適用を試みるものである。

オットー機関では温室効果ガス対策にアルコール燃料が専ら利用されてきたが、ディーゼル機関用のバイオ燃料

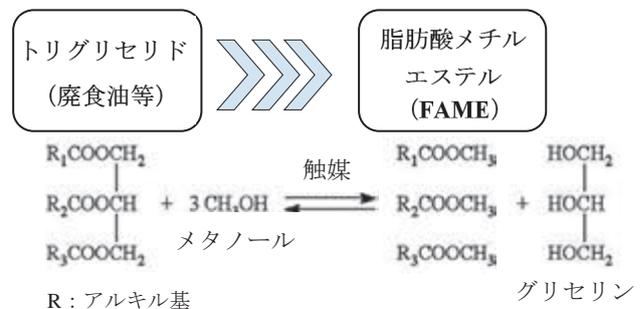


図1 廃食油からバイオディーゼル燃料(BDF)の製造

1)東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 航空宇宙工学コース  
2)東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 一般科目(化学)

[10] [11]をオットー式の実験機関に適用してその可能性を調査することを目的としている。

この燃料はバイオディーゼル燃料(以降 BDF)と呼ばれ、ヨーロッパ諸国が先行してディーゼル機関へ活用を進めている[12]。BDF には菜種油、大豆油、廃食用油を原料として製造される脂肪酸メチルエステル[11] (FAME) 及びその軽油混合燃料が使用されている(図1)。

なかでも廃食用油を原料とした BDF は食用油確保との競合が無く、廃棄物を利用することから循環型社会構築に向けて有望な選択肢であり、日本国内から調達される BDF 原料は廃食用油が中心となっている[13] [14]。本研究で使用する廃食用油バイオ燃料は、この廃食用油を原料とした市販の BDF [11]である。しかし、近年のディーゼル機関は燃料ポンプの高圧化や噴射制御の緻密化により軽油燃料を前提として高効率化と排気ガス低減を行っているため、高濃度 BDF 燃料の使用は故障の原因となる。このため、国内では BDF の混合割合が実用上 5%程度[15]までに制限され、温室効果ガスの排出削減効果はその分限定的となる。

本研究では循環型社会を目指しながら温室効果ガス削減の有効な手段である BDF 燃料の適用範囲を従来のディーゼル機関に限定せず、オットー機関へ拡大する可能性について調査するための研究を行った。本報告では、著者らが研究対象としてきたオットー式灯油機関を用いて、灯油燃料に BDF を混合した場合の運転性、出力、排気ガスや燃焼特性を調べた結果について報告する。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験機関[9]の諸元を表1に示す。また、図2に実験で使用した燃焼サイクル解析装置の全体と各種計測機器のレイアウトを示す。実験機関をこの燃焼サイクル解析装置にセットして灯油及びBDF混合燃料(混合割合 5%~40%)を用いて実験を行った。

実験に際しては、燃料種毎にそれぞれ運転可能な空燃比に予め調整を行ってから運転を開始し、動力測定、燃焼圧力測定、排ガス分析などを行った。また、得られた燃焼圧力履歴データ(サンプリング間隔  $5\mu s$ )をもとに異常燃焼の確認や燃焼サイクル解析を行い、図示仕事とその変動・ばらつきを求め実験機関の運転性を確認した。

さらに、シリンダヘッドに燃焼圧力センサと石英ガラス製の可視化観測窓を設置し、運転中の燃焼圧力計測と同時

表 1 実験機関の諸元

機関形式	オットー式空冷4サイクル1気筒
バルブ機構	側弁式
排気量	143cc ( $\phi 63 \times 46\text{mm}$ )
圧縮比	4.7
出力	1.5 kW

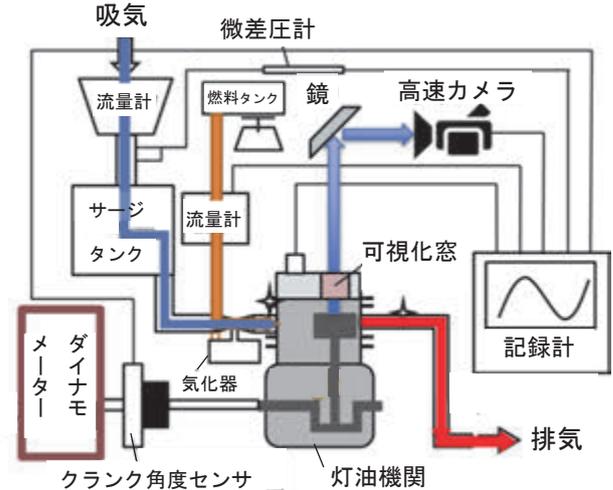


図 2 燃焼サイクル解析装置

に高速度カメラにより燃焼過程を高速録画した。これにより 1 回燃焼毎の燃焼過程を可視化観察することができ、燃料種ごとの燃焼特性や解析結果の解釈に役立てた。

## 3. 実験結果

### 3-1. 灯油・BDF 燃料による定常運転

はじめに灯油に BDF を 5%~40%含有した燃料を用いた場合の定常運転性を確認した。比較のため灯油 100%燃料を用いた実験も行った。運転条件として表2の回転数と負荷トルクの組み合わせを設定して実験した。

表 2 実験機関の運転条件

機関回転数	2400, 2800, 3200, 3600 rpm
負荷トルク	無負荷, 2.0, 4.0 Nm

定常運転性の確認は、シリンダ内で発生した仕事を 1 燃焼サイクル毎に比較するため、90 サイクル分の

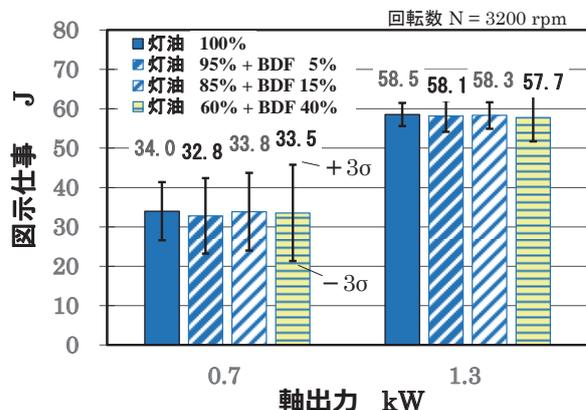


図 3 実験機関の出力と燃焼変動 3,200rpm

図示仕事を統計的に処理して比較した。図示仕事はシリンダの筒内圧力値及びクランク角信号から得られる圧力-容積線図（P V線図）により囲まれる面積を自動的に算出するプログラムにより 1 燃焼サイクル毎に求めた。

図 3, 図 4 はその結果をまとめたもので、縦軸に図示仕事をとり、図示仕事の平均値を棒グラフで示し、90 燃焼サイクル中のばらつき（サイクル変動）を $\pm 3\sigma$ （ $\sigma$ ：標準偏差）のエラーバーで示した。図 3 は回転数が 3200 r p m, 正味出力が 0.7 k W と 1.3 k W となる条件での実験結果, 図 4 は回転数が 3600 r p m, 正味出力が 0.8 k W と 1.5 k W となる条件での実験結果である。

棒グラフで示される図示仕事の平均値は、図 3, 図 4 いずれも B D F 燃料の添加割合によらず大きな差異は見られない。一方、サイクル変動については B D F 燃料の添加割合が増加するに伴い大きくなるが、添加割合が 15% 以下では灯油の場合と大きな差は見られない。サイクル毎の図示仕事を分析した結果から、今回の実験条件では灯油に B D F を 5% ~ 40% 混合した燃料では失火や異常燃焼のない正常な定常運転が可能であることを確認した。

### 3-2. 燃焼圧力と熱発生パターンの解析結果

図 5, 図 6 は、それぞれ灯油のみ又は灯油に B D F を 15% 混合した燃料（以降、B D F 15% 混合燃料）を用いた場合に、負荷トルクを 2.0 Nm, 回転数を 2800~3600 r p m に変えて運転した場合の燃焼圧力と熱発生率であり、横軸はクランク角度である。B D F 燃料は灯油に比べて揮発性が低いいため、燃焼期間の長期化が懸念されたが、熱発生率をみるとどちらの燃料とも燃焼期間(10%~90%燃焼)は約 70° で大きな違いはない。

それとは別に、回転数を変えた場合の熱発生パターンの変化に燃料の違いが現れている。灯油の場合は回転数が低い 2800 r p m で比較的早い角度で熱発生が立ち上がるが、B D F 混合燃料の場合はクランク角度でみた熱発生の立ち上がりが出現する時期にほとんど違いがない。クランク角度が 1° 進む実時間は 3600 r p m のときに 46  $\mu$ s に対し、2800 r p m のときは 60  $\mu$ s であり、時間差にして 14  $\mu$ s 遅くクランク角度が進行する。この時間的猶予にも関わらず B D F 混合燃料の場合は熱発生が速やかに活発化しない傾向があると考えられる。

### 3-3. 燃料消費率及び排気ガス

図 7 は負荷トルク 4.0 Nm で燃料消費率を測定した結果である。今回の条件範囲では B D F 混合燃料の燃料消費率は灯油とガソリンの中間となり、B D F 燃料混合による燃料消費率の悪化は見られない。

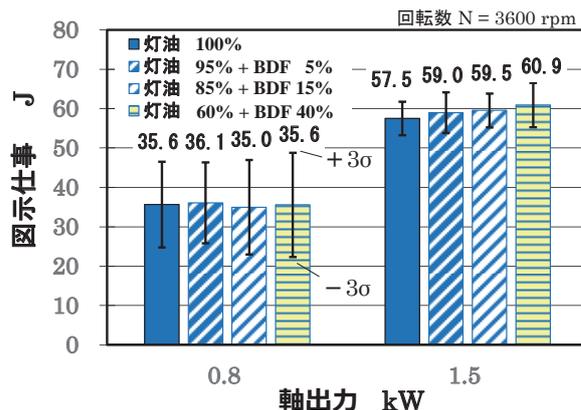


図 4 実験機関の出力と燃焼変動 3600rpm

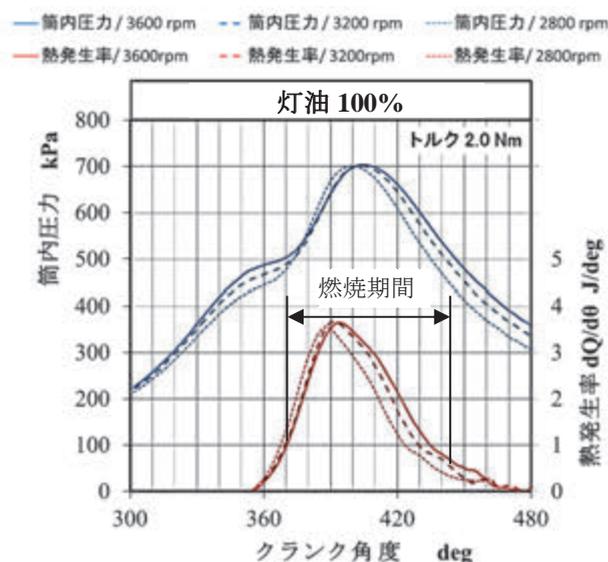


図 5 灯油 100%時の筒内圧力と熱発生率

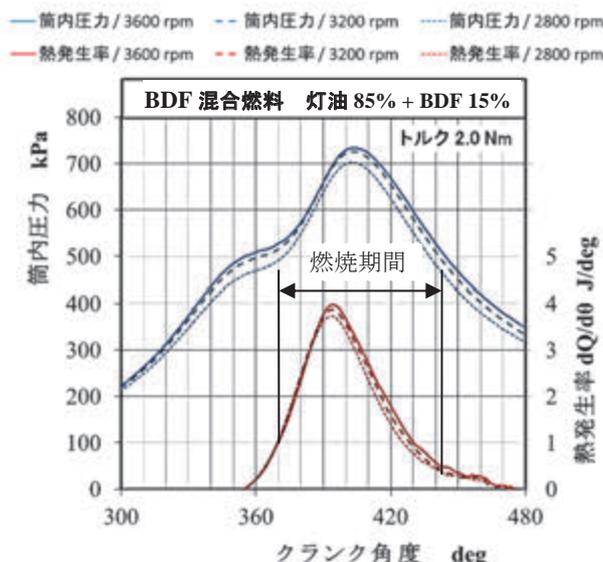


図 6 BDF15%混合時の筒内圧力と熱発生率

図8は負荷トルク 4.0 Nm で排気ガス中のHC濃度及びCO濃度を測定した結果である。BDF混合燃料による運転時はHC濃度がガソリン運転時と灯油運転時の中間となる傾向にあった。またCO濃度についてはBDF混合燃料による運転時にやや悪化がみられた。これは、BDF混合燃料は気化性の低い部分が含まれるため、燃料の蒸発が一樣に起こらず、混合気の一部に過濃な領域が生じ、部分的な不完全燃焼によるCO増加があったのではないかと考えられる。

### 3-3. 燃焼室内の可視化実験結果

図9は灯油及び灯油-BDF15%混合燃料を用い、負荷トルク 2.0 Nm, 回転数 3200 rpm の条件(図5と図6の粗い破線)で撮影した燃焼室内の高速撮影画像(9,000 fps, シャッター1/16,000 s)を分解写真で示したものである。この高速撮影画像を詳細に調べた所、失火や異常燃焼は発生していないことが確認された。また、BDF混合燃料による運転時も、灯油運転時とほぼ同時期に燃焼室全面への火炎伝播が完了し、燃焼領域の拡大から消失までのクランク角度についても両者の燃料で大きな差異は見られなかった。可視化による結果は、図5、図6の筒内圧力の解析結果と符合していた。クランク角度 370° の場合において既燃部の輝度の違いが見られたが、空燃比の違いによる影響を強く受けた可能性もあるため、燃料の違いに起因したものかは特定できない。今後は空燃比をより精度良く一致させる実験方法を検討する必要がある。

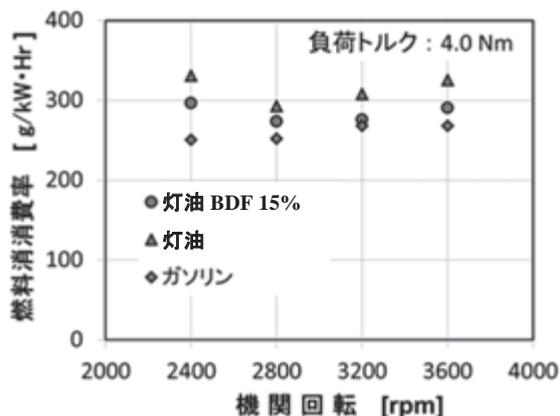


図7 実験機関の燃料消費率

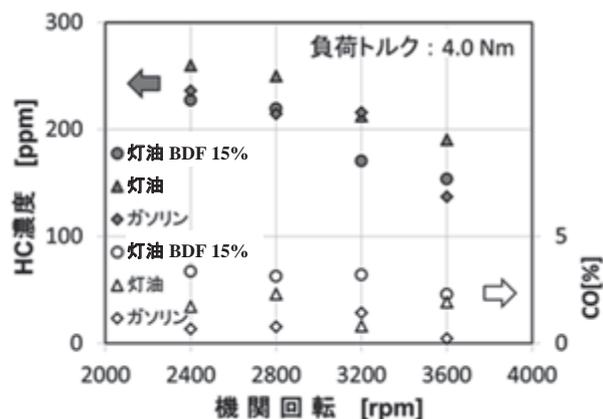


図8 実験機関の排気ガス特性

クランク角度	350°	370°	390°	410°
灯油 100%				
灯油- BDF 15% 混合燃料				

図9 燃焼室内の高速撮影画像(分解写真)

#### 4. 結論

市販ガソリン機関をベースとして灯油燃料に適合させたオート式灯油機関を実験に用い、廃食油BDF燃料を混合した灯油を使用し、本研究の実験条件下でサイクル解析・可視化実験を行って以下の知見を得た。

- (1) サイクル解析により求めた図示仕事を分析し、灯油に廃食油BDFを5%～40%混合した場合にも失火や異常燃焼のない正常な定常運転が可能である。
- (2) 負荷トルク 2.0 Nm, 低回転 2800rpm のとき、廃食油BDF混合燃料による運転時は、燃焼開始直後の熱発生の活発化がやや遅くなる傾向が見られた。これは廃食油BDFを混合した影響とみられる。
- (3) 廃食油BDFを15%混合した灯油を用いて運転した場合に、燃料消費率やHC濃度の悪化は見られなかったが、CO濃度はやや悪化した。
- (4) 負荷トルク 2.0 Nm, 回転数 3200 rpm の条件で高速撮影した燃焼室内の可視化画像により、廃食油BDFを15%混合した灯油を用いた場合にも、失火や異常燃焼は発生していないことが撮影画像により視覚的に確認された。

#### 5. 今後の計画

BDF混合燃料による影響として、燃焼圧力を観察した結果からすると、燃焼開始直後の熱発生の活発化が緩慢となる傾向があったため、定常運転を行う発電機などの用途に向くのではないかと予想される。

また、今回の実験では気化器の空燃比については、実験に用いた気化器の特性に依存していたことが分かったため、それぞれの運転条件で空燃比の変動を抑えるための実験方法を検討していきたい。

#### 謝辞

本研究にあたり、協力を頂いた当時 SUBARU GROUP 産業機器株式会社をはじめ関係各社に感謝の意を表します。また、本校の一般科目（化学）高橋龍也教授には燃料製造プロセスに関する助言を頂きましたことにお礼申し上げます。

最後に、本研究の実験にあたり常に探求心を失わず実験装置の製作や実験に精力的に取り組んだ H30 年度卒業研究生の大石剛、戸塚雅也、渡邊大河の諸君、実験装置の改良やデータ信頼性の向上に貢献した R01 年度卒業研究生の植田悠太郎、亀ヶ谷尚志、今田智、山口遼平の諸君に深く感謝します。

尚、本研究費の一部は都立産業技術高専の特定課題研究費によったことを申し添えます。

#### 参考文献

- [1] 外務省、「G8北海道洞爺湖サミット首脳宣言」、北海道洞爺湖サミット、2014。
- [2] 武田、森谷、棚沢、「ディーゼル燃料としてのメチルエステル・灯油混合燃料の諸特性」、日本機械学会論文集、70巻691号、2004。
- [3] 野田、坂本、堀、佐藤、河合、「バイオディーゼル燃料（BDF）使用時における排出ガス等への影響調査」、交通安全環境研究所受託研究成果集CD-ROM, Vol.2003, 2003。
- [4] 羽原、塚本、千田、「直噴式ディーゼル車両を用いた廃食油バイオディーゼル燃料の季節の変化による排気特性」、自動車技術会 2005 春季学術講演会前刷集, No.57-05, 2005。
- [5] 山根、浅川、沼尾、小森、「バイオディーゼル燃料使用時のDPFの特性（第一報）」～DPFの車両走行およびリグ試験の結果～、自動車技術会論文集, Vol.35, No.3, 2004。
- [6] 全国都市清掃会議、「バイオディーゼル燃料化施設に関する技術情報の整理」、環境省請負業務報告書, 2005。
- [7] 「バイオエタノールの導入に関するこれまでの取組と最近の動向」、資源エネルギー庁 資源・燃料部 政策課, 2017。
- [8] 水素・燃料電池戦略協議会、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」、資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギーシステム課, 2019。
- [9] 小林、山田、宇田川、「灯油系燃料を用いた火花点火機関の基礎研究」、東京都立産業技術高等専門学校 研究紀要, 第13号, pp.35-44, 2018。
- [10] 日本エネルギー経済研究所、「日本におけるバイオディーゼル（BDF）の導入について」、第34回研究報告・討論会資料, 2008。
- [11] JIS規格 JIS K2390:2016, 規格名称:自動車燃料—混合用脂肪酸メチルエステル（FAME）, 2016。
- [12] 「BDF（バイオディーゼル燃料）利用に関する現状と今後の方向」、農林水産省 農業資材審議会 農業機械化分科会 基本方針部会 第5回配布資料, 2005。
- [13] 「輸送用エコ燃料の普及拡大について（補遺版）」、環境省 エコ燃料利用推進会議, 2009。
- [14] 「バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン Ver.1.0」、環境省, 2010。
- [15] 「バイオディーゼル燃料の製造・利用に係るガイドライン」、全国バイオディーゼル燃料利用推進協議会, 2016。