ジャトロファ油の水エマルジョン化による燃焼特性改善*

-予燃焼室式ディーゼルエンジンにおける燃焼解析

宮 脇 直 也*** 段 智 久**
橋 本 正 孝** 浅 野 一 朗***Improvement of Combustion Characteristics of Jatropha Curcas Oil by Water Emulsification
-Combustion Analysis in Pre-combustion Chamber Type Diesel Engine

By Naoya MIYAWAKI, Tomohisa DAN, Masataka HASHIMOTO, Ichiro ASANO

From the viewpoints of limited fuel oil resources and the problem of global warming, possible alternatives to fossil oil have been widely studied in recent years. Jatropha curcas oil is one of the vegetable oils considered as possible alternatives to fossil fuel. It is effective in reducing CO₂ emissions with its carbon-neutral characteristic, and it does not contribute to the problem of increasing food prices because its seeds are poisonous and are thus inedible. This study aims to clarify whether water emulsification can improve the combustion characteristics of Jatropha curcas oil. The experiments were conducted with water-to-Jatropha curcas oil ratios of 5%, 10%, 15%, and 20% by weight, and combustion analysis was carried out. The test engine used was a 4-stroke pre-combustion chamber type diesel engine which can generally run on poor quality fuels. Combustion pressure and fuel injection pressure as well as exhaust gas emissions were measured. It was shown that water emulsification resulted in the improvement of thermal efficiency and the reduction of NO_x emissions and carbon deposits.

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、ガソリンエンジンなど他の内燃機関より熱効率が高い特徴を持っているが、窒素酸化物(NO_x)や粒子状物質(PM)のような有害物質を排ガス中に多く含んでおり、人体に対する影響と大気汚染問題が懸念されている。そのため、政府や自治体によってそれら有害物質の削減に関する法律が制定されており、排出低減にむけた技術の確立が急務とされている。さらに、内燃機関で使われる燃料は、現在そのほとんどを化石燃料に依存している。その消費量は年々拡大傾向にあるため化石燃料の消費低減が重要となっている。そこで、バイオ燃料を含む代替燃料の研究が近年さらに重要性を増している。

ジャトロファ油は、内燃機関の代替燃料として期待されているバイオ燃料の一つである^[1]。ジャトロファの種子には毒性を持つ物質を含有するため食用には用いられない。そこで燃料の観点からみると、ジャトロファ油は食物との競合による穀物の価格上昇を生じず、バイオ燃料として適しているといえる。しかしながら、

その動粘度は軽油やA重油などに比較して高いため、内燃機関の燃料として用いた場合に燃焼の悪化を招く。

一方、水エマルジョン化することによって難燃性の燃料の燃焼を改善できることが知られている。様々な研究から、エマルジョン燃料が燃焼する際にNO_x やすすが抑えられるという結果が報告されている^[2]。その理由として、エマルジョン燃料油中に含まれる微小な水滴の急速な膨張、つまりマイクロ爆発が寄与するという説、水蒸気による燃料希釈や火炎温度低下および水性ガス反応などの水蒸気の化学反応的作用によるためという説、水の含有量に応じて噴霧質量が増大するので噴霧束内への空気導入が増大し混合気形成が改善されるという説などがある^{[3][4][5]}。

本報では、予備的な実験として、予燃焼室式ディーゼルエンジンを用いて、ジャトロファ油の水エマルジョン化によってNO_x やすすの発生が抑制可能かを検証した結果を報告する。

2. エマルジョン燃料について

2.1 エマルジョン燃料の調製方法 本研究では、ジャトロファ油に水道水と乳化剤を加え、回転するプロペラによって生じるせん断力を利用して水エマルジ

*原稿受付 平成22年10月6日

**正会員 神戸大学大学院海事科学研究科(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 神戸大学大学院海事科学研究科

ヨン燃料を調製した。質量比で水を燃料油に対して 5%, 10%, 15%, 20%を加え, 攪拌時間は 30 分間一定とした。乳化剤については様々な種類を試した結果, 最も安定した状態を保持できた 3 種類 (RHEODOL SP-L10, RHEODOL S 440V, EMULGEN 103) を使用した。なお乳化剤は, 全ての水エマルジョン燃料において水量に対して質量比で 10%の量を使用した。

2. 2 エマルジョン燃料の観察 エマルジョン燃料調製後, 1 時間室温 (16°C) で放置した後の混合状態の観察を行った。Fig. 1 に攪拌直後の状態写真を, Fig. 2 に 1 時間経過後の状態写真を示す。5%, 10%, 15%の水を混合したエマルジョン燃料は, 油水分離や多層分離といったものを引き起こさなかった。しかしながら, 水 20%混合させた燃料は燃料調製 1 時間後には容器の底部分にわずかな油水分離が見られた。そこで, エマルジョン燃料による燃焼試験を行う際は, 調製後 1 時間以内に使用することとした。

Fig. 1 調製直後のエマルジョン燃料

Fig. 2 調製 1 時間後のエマルジョン燃料

2. 3 エマルジョン燃料中の水粒子 Fig. 3 に 1000 倍で拡大したジャトロファ油エマルジョン燃料の顕微鏡写真を示す。図において左から右に 5%, 10%, 15%, 20%の水添加エマルジョン燃料を示した。写真より, 水の添加量が増加すると直径の大きな水粒子の出現頻度が高くなることから分かる。そこで, 顕微鏡写真からそれぞれの燃料の水の粒径の分布を測定し, Fig. 4 ~ 7 に示した。図中には算術平均粒径 D_{10} , ザウタ平均粒径 D_{32} の計算値を示している。水添加率 5~15%までは, D_{10} はほぼ同程度の値であるが, 20%の場合には直径は倍ほど大きな値になっている。また D_{32} の水添加率に対する増加傾向を見ると, 水添加率が増加すると大

Fig. 3 エマルジョン燃料の顕微鏡写真

Fig. 4 水 5%エマルジョンの水粒子径分布

Fig. 5 水 10%エマルジョンの水粒子径分布

Fig. 6 水 15%エマルジョンの水粒子径分布

Fig. 7 水 20%エマルジョンの水粒子径分布

きな直径の水粒子頻度が増加していることが分かる。本研究では、回転するプロペラによって攪拌しながらジャトロファ油に水と乳化剤を徐々に加えていってエマルジョン燃料を作製したが、この方法では比較的直径の大きな水粒子が遠心力で容器外側に分散され、十分に攪拌されないままに残留したと考えられる。なお、エマルジョンの作製方法については、別の方法を現在検討しているところである。

3. 実験条件および方法

3. 1 動粘度の測定 ジャトロファ油水エマルジョン燃料の動粘度をスピンドル式粘度計 (Brook Field 社) によって測定した。水量は 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 質量比で混合させた燃料の測定を行い、温度は室温 (16°C) で一定とした。混合比率と動粘度の関係を

Fig. 8 エマルジョン燃料の動粘度 (16°C)

Table 1 供試エンジンの主要諸元

Engine type	3 cylinders, 4 cycle, Diesel Engine
Combustion type	Pre-Combustion Chamber
Bore x Stroke	120 mm x 135 mm
Engine displacement	1526 x 3 cm³
Compression ratio	18.7
Rated output	25.7kW@1500rpm
Injection pump	Bosch PF type
Injection timing	10 deg. B.T.D.C
Injection nozzle	Pintle type
Injection pressure	15.7MPa
Maximum output	33.1kW@1500rpm

Fig. 9 実験装置と計測系統図

Fig. 8 に示す。グラフから、添加する水量が増加するとともに動粘度も上昇する傾向があることが確認できる。動粘度が比較的高い値となっているため、エンジン燃焼試験では燃料タンク内に 0.05MPa の圧力をかけて燃料を噴射ポンプに圧送した。

3. 2 エンジン性能試験 本実験では 3 シリンダー 4 サイクル予燃焼室式ディーゼル機関を使用した。Table. 1 にエンジンの主要諸元を示す。試験燃料はジャトロファ油に対して質量比で水を 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 混合したエマルジョン燃料を使用し、燃焼解析を行った。実験装置と計測系統図を Fig. 9 に示す。燃焼室内の圧力履歴は No. 3 シリンダー (動力計側) の主室で計測し、燃料噴射圧力も同シリンダーのノズルホルダ入口部で計測した。圧力は、連続する 50 サイクルを平均して、その時間履歴を評価した。排ガスはすす、酸化窒素 (NOx)、酸素 (O₂)、二酸化炭素 (CO₂)、一酸化炭素 (CO) を測定した。すす濃度はスモークメーター (BAZAI DSM-10) により反射式光学測定法で計測した。NOx 濃度は化学発光方法で、CO₂ と CO 濃度は非分散式赤外線法で、O₂ 濃度は磁気圧力式測定法で測定した。吸入空気は、大気圧から 21 kPa の過給を行い、エンジン回転数は 1500rpm 一定とした。出力は最大出力 (33.5kW) に対して、25%, 50%, 75%, 100% の 4 段階で測定を行った。ただし、水 20% 添加したエマルジョン燃料の場合、最大出力時にエンジン回転数が安定しない不安定な運転となったため、25%, 50%, 75% の 3 段階の負荷について解析した。この条件でエンジン運転が行えなかった理由は、水を多量に含むことによる単位体積当たりの燃料の発熱量が減少したことが原因と推測できる¹⁴⁾。エンジン性能の測定においては、まず軽油にて始動後して暖機を行い、排気ガス温度の値が安定した後にジャトロファ油エマルジョン燃料に切り替えて計測を行った。

4. 実験結果および考察

Fig. 10 から 13 に、上死点付近を拡大した燃焼圧力の時間履歴を示す。それぞれの図中には軽油燃料の測定結果も参考に示した。また、Fig. 14 に着火遅れ期間を計算した結果を示す。各出力において見られる特徴として、着火後遅れ期間は含まれる水の量が増加するとより長くなる傾向にあり、また最大燃焼圧力も最少出力条件を除いて水添加量に比例して大きくなる。出力が大きい場合、燃焼室内の雰囲気温度が上昇し、壁面からの熱損失も小さくなることから、着火遅れ期間の燃料種類による差は小さくなると考えられる。

Fig. 10 燃焼室圧力履歴 (8.5kW, 25%負荷)

Fig. 12 燃焼室圧力履歴 (25.1kW, 75%負荷)

Fig. 11 燃焼室圧力履歴 (16.8kW, 50%負荷)

Fig. 13 燃焼室圧力履歴 (33.5kW, 100%負荷)

各排ガス濃度測定の結果を Fig. 15 から 18 に示す。

Fig. 15 に NOx 排出量を示す。NOx 排出量は、水の添加率に応じて減少する傾向があった。これは含まれる水量が増加すると、水が蒸発する際に雰囲気気体の温度が低下し、水量が増えるとその傾向が顕著になるためであると考えられる。また、水を添加することで燃焼場の局所温度が低下する^[6]ことも要因の一つである。水添加による NOx 排出量削減効果は、低出力時に顕著である。燃焼圧力線図で示すように、各燃料間の着火遅れ期間は、エンジンが低出力時の場合により大きくなっている。本研究で使用したエンジンは予燃焼室式であり、燃料は主燃焼室に噴射された後、主室へと移動して空気と混合しながら燃焼が進行する。着火遅れが長い場合、主室における燃料燃焼時間が長くなり、燃料過濃状態で燃焼が進行した結果、NOx 低減につながったものと思われる。

Fig. 16 に CO 排出量を示す。CO 排出量は添加する水量が多いほど増加する傾向があり、高出力時よりも低出力時により顕著にその傾向が現れている。これは水の気化による燃焼室雰囲気温度低下が低出力時に大きく現れるからであると考えられ、そのことが不完全

Fig. 14 着火遅れ期間

燃焼成分の排出が増加した原因であると考えられる^[8]。エンジン出力が大きくなると、雰囲気温度が十分に高くなって燃焼が良好に行われる結果、CO の排出量は著しく小さくなる。

Fig. 17 にすす濃度を示す。低出力時にはエマルジョン燃料のすす濃度は非常に低い値を示している。しかし出力が上がると、煙濃度はジャトロファ油 100%燃料よりもエマルジョン燃料の方が高くなる条件(水 5%添加と水 10%添加)がある。これは、水の蒸発により

Fig. 15 NOx 排出量

Fig. 17 すそ濃度

Fig. 16 CO 排出量

Fig. 18 熱効率

燃焼場の温度が低下し、水添加量が高くなるにつれて燃焼効率が低下することが原因と推測される。水を 5%と 10%混合させたエマルジョン燃料は増加する割合が高くなる傾向が強く、最大出力時にはジャトロファ油よりも高い値となっている。CO 排出の結果で述べたとおり、水の混合量が大きすぎると、燃焼効率がより悪くなると推測されるので、水を混合することによる温度降下は煙濃度の増加につながると考えられる。

熱効率の算出結果を Fig. 18 に示す。水を 10%含んだエマルジョン燃料は低出力時に最も高い熱効率を示している。また水を 15%添加したエマルジョン燃料は高出力時に最も高い熱効率を示している。軽油 100%の熱効率と比較しても水を 15%添加したエマルジョン燃料はほぼ同等の熱効率を示している。

最後に、各燃料で運転した後のノズル表面の様子を比較した。ノズル表面を清掃してからエンジンに取り付け、各出力条件 (25%, 50%, 75%, 100%負荷) で 15 分、連続で約 1 時間 (消費燃料量約 7 kg) 運転を行った後にノズル表面を撮影した。ただし、水 20%添加の燃料では 25%, 50%, 75%負荷の 4 5 分運転である。Fig. 19 に写真撮影結果を示す。ジャトロファ油 100%燃料条件のノズル表面と比較すると、エマルジョン燃料で実験した噴射ノズルのカーボンデポジットはすべ

Fig. 19 ノズル表面 (1 時間運転後)

ての場合において少なくなった。またカーボンの付着量は、水の混合率が増加することでより少なくなっている。特に水を 15%, 20%添加したエマルジョン燃料では、この運転時間内ではカーボンの付着がほとんどないことが分かる

5. おわりに

本報の実験では、ジャトロファ油を水エマルジョン化し、エマルジョン燃料の特性と予燃焼室ディーゼルエンジンにおける燃焼解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 本実験で用いた乳化燃料の作製方法では、水の添加量が増加すると直径が大きな水粒子の出現頻度が高くなり、結果としてザウタ平均粒径は水の添加量とともに増加した。
2. 着火遅れ期間は、水の添加量が増加すると長くなる傾向にあり、最大燃焼圧力も水添加量に比例して高くなる。
3. NO_x 排出量とノズルに付着するカーボンは、水の添加量とともに減少する。
4. 熱効率は、ジャトロファ油 100%に比較して水エマルジョン燃料の場合は高くなる傾向にあり、水 15%添加エマルジョン燃料の場合には軽油と同等の熱効率を示した。

水を 20%混合させたエマルジョン燃料が、高出力時に安定して運転できなかった理由として、燃料の単位体積当たりの発熱量の低下、エマルジョン燃料の水と油の分離などが予想される。つまり水の混合量が多ければ多いほど優秀な燃料であるとは言い切ることはできない。そのことから本実験では、水の混合比の最適値は 10%から 15%の間であるという結論に至った。こういった短所をいかに改善するかが課題となってくる。

参考文献

- [1] Yoshida T., Tanaka Y., Toma T., Yamamoto K., “A trial plantation of *Jatropha curcas* and its BDF utilization in Indonesia”, The Japan Institute of Energy, Vol.3 (2008), pp.50-51.
- [2] Hirano H., Kee Sung-Sub, Mohammadi A., Kidoguchi Y., Miwa K., “A Study on Soot Reduction in Diesel Combustion using Emulsified Fuel”, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.41(2003), pp.213-214.
- [3] Fuchihata M., Takeda S., Ida T., “Effect of Water drop Diameter on Combustion Characteristics of W/O Emulsion Spray Flames”, JSME annual meeting, Vol.3 (2004), pp.11-12.
- [4] Kinoshita E., Yoshimoto Y., “Applied Technology of Vegetable Oils for Diesel Engines –Use of various Fuels expect for Biodiesel Fuel–”, Journal of the Combustion Society of Japan, Vol.51 No.157, (2009) P.209-216.
- [5] Ishibashi Y., Akiba S., Tamada D., “Combustion of Emulsions in Small Pool Burners”, Journal of the Japan Institution of Marine Engineering, Vol.43 No.2, (2008), pp.90-96.
- [6] Morino T., Morimune T., “Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Water-Emulsified Fuel”, Symp. on Environmental Engineering, Vol.16 (2006), pp.282-285.
- [7] Yoshimoto Y., Onodera M., “Performance and Emissions of DI Diesel Engine Fueled by Vegetable Oil-Water Emulsions and the Characteristics of Combustion of Single Particles”, Symp. on Environmental Engineering, Vol.14 (2004), pp.223-226.