徐 芝 徳** 西 尾 澄 人**
井 亀 優** 桑 原 孫四郎***

Effect of Fuel Injection Control on Vegetable Oil Combustion in Marine Diesel Engine

By Zhide XU, Sumito NISHIO, Masaru IKAME, Magoshiro KUWABARA,

In this research an assist-injector was newly developed to improve the CO, THC and smoke emissions from a marine diesel engine fueled with vegetable oil. The effect of pre-injection and after-injection on the combustion characteristics and the exhaust emissions were investigated by engine test bench experiments. Results show that the assist-injector is effective for CO, THC and smoke emissions reduction. The reduction efficiency of CO, THC and smoke is about 30% with after-injection, and is over 50% with pre-injection.

Key Words: Vegetable oil, Marine diesel engine, Assist-injector, Pre-injection and After-injection

1. はじめに

現在、地球温暖化対策が重要な課題となっており、バイオ燃料使用による二酸化炭素 (CO₂) 排出削減が期待されている。著者らは、バイオ燃料をエステル化処理せず船用燃料として利用することに着目し、菜種油、パーム油などの植物油を船用ディーゼル機関に適用し、その燃焼・排ガス特性を明らかにした^{1), 2), 3)}。植物油は軽油・A重油に比べて粘度が高く、蒸発性が低く、低負荷での燃焼が悪いため一酸化炭素 (CO)、全炭化水素分 (THC) 濃度およびスモーク値が高く、対策が必要であることが分かっている。石油系燃料での燃焼改善と有害排ガス低減をするには、コモンレール式燃料噴射装置が大きく寄与している。小川ら⁴⁾はアフター噴射によるディーゼルの燃焼改善、神谷ら^{5), 6)}は多段噴射によるディーゼルの有害排ガス低減などの研究を行った。しかし、コモンレール式燃料噴射装置を用いて、植物油への燃焼改善と有害排ガス低減に関する研究例は少なく、不明点が多い。本研究では、植物油燃焼への燃料噴射制御技術として小型コモンレール式燃料噴射装置と機械式燃料噴射装置を組み合わせた新しい燃料噴射装置 (アシスト噴射と呼ぶ) の開発に取り組み、アシスト噴射による低負荷での植物油の CO, THC 及びスモークの低減を試みた。その結果を報告する。

2. アシスト噴射の機構

Fig. 1 Assist-injector

植物油の低負荷での燃焼を改善するためには、燃料噴射の高圧化や噴射時期、噴射パターンの変更などが考えられる。自動車用ディーゼル機関においては、コモンレールを用いた電子制御燃料噴射装置が一般的になっている。しかし、これを船用ディーゼル機関に適用しようとする、1回当たりの噴射量が多いため、コモンレールや加圧ポンプの大型化という問題が生じ、大幅なエンジン改造が必要になる。そこで、Fig.1 に示すように、機械式燃料噴射装置に

* 原稿受付 平成 22 年 9 月 15 日。

** 正会員 (独) 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

*** (独) 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

小型コモンレール式燃料噴射装置を付加することで、安価に、また既存のエンジンに比較的容易に適用できる燃料噴射装置を開発した。既存の機械式燃料噴射（以下メイン噴射と略記）に電子制御噴射を加えることから、アシスト噴射と命名した（以下アシスト噴射と略記）。

メイン噴射する機械式燃料噴射ポンプのプランジャー径は20mmで、ストロークは18mmである。燃料噴射ノズルは $\phi 0.32 \times 7$ 穴、開弁圧は約26MPaである。これに対して、アシスト噴射するコモンレール式燃料噴射装置は、6気筒総排気量約15.7リットルの自動車用ディーゼルエンジンの最高圧力180MPaのコモンレールを使用している。

Fig.2 にアシスト噴射による噴射圧の調整を示す。Fig.3 にアシスト噴射のパターンを示す。Fig.2, Fig.3 に示すように、アシスト噴射の特長は、エンジン回転数と負荷率に依存せず噴射圧力や噴射時期を制御することが可能である。また、プレ噴射、アフター噴射等、多様な燃料噴射パターンが可能である。アシスト噴射のメリットとしては、①小型化が可能、②自動車用の電子制御噴射装置の活用が可能（安価）、③比較的改造が少なく既存のエンジンに適用が容易である。

3. 実験装置及び実験方法

実験装置を Fig.4 に示す。主な構成は、船用中速4ストロークディーゼル機関（松井鉄工所製、MU323DGSC 型、主要目を Table1 に示す）、アシスト噴射装置及び排ガス計測装置から成る。実験方法は、菜種油 50%と A 重油 50%の混合油を使って、船用特性に従って、負荷率 25%（機関出力：64.5kW、機関回転数：265rpm）でアシスト噴射のタイミングと噴射量を変えて実験を行った。

排ガス計測では燃焼ガス分析計（テスト製、350XL 型）を用いて、NO_x、CO、O₂、CO₂ 濃度を計測した。スモーク値（汚染度%）の計測は、JIS D 8004 に準拠した光反射式スモークメータ（SOKKEN 製、GSM-3 型）を使用した。本エンジンのスモーク値は低いため、通常の 5 倍の体積の吸引を 5 回実施し、その平均値を計測値とした。排ガス中の THC の計測は全炭化水素濃度計測装置（日本サーモ製、51C-LT/HT 型）を使用した。サンプルガスの加熱導管温度は 191℃に設定した。

実験に際し、機関を各運転条件に設定後、30 分以上運転し、機関の状態が安定した後、筒内圧データをクランク角度 0.5 度間隔で収集するとともに排ガス計測を実施した。

Fig. 2 Pressure control of assist injection

Fig. 3 Assist injection pattern

Fig. 4 Experimental setup

Table 1 Specifications of test engine

Engine name	MU323DGSC
Engine type	4 stroke exhaust turbocharged direct injection type
Cylinder number	3
Cylinder diameter	230mm
Stroke	380mm
Engine maximum output	257.4kW
Engine maximum speed	420rpm
Mean effective pressure	1.55MPa

4. 実験結果及び考察

4. 1 アシスト噴射による排ガス及び燃焼改善効果

Fig.5 に負荷率 25% (機関出力: 64.5kW, 機関回転数: 265rpm) で, メイン噴射の噴射タイミングを BTDC10° に設定し, アシスト噴射無し(図中 Assist Injection OFF)とアシスト噴射有り(図中 Pre-injection ON と After-injection ON)での CO, THC, スモークおよび NOx 計測結果を示す. ここでアシスト噴射条件は, プレ噴射: BTDC20°, 噴射期間 1.5ms (出力換算で約 25% 負荷率の噴射量の 1.5% 相当); アフター噴射: ATDC10°, 噴射期間 2.5ms (出力換算で約 25% 負荷率の噴射量の 6% 相当) とした. アシスト噴射によって, CO, THC 及びスモークともに減少しており, 減少幅はアフター噴射効果約 30%, プレ噴射効果 50% 以上である. アシスト噴射は低負荷での植物油の CO, THC 及びスモークの低減に効果があると判断できる. NOx については, プレ噴射の場合約 15% 増え, アフター噴射の場合約 15% 減った. また, 同図に示したプレ噴射とアフター噴射を両方使用した結果 (このときメイン噴射は BTDC7° に設定) は, NOx を抑えつつ, CO, THC 及びスモークの低減ができた. これはプレ噴射とアフター噴射の相乗効果によるものと考えられる.

排ガス計測の結果を解析する為に Fig.6 と Fig.7 にアシスト噴射無しと有りでの筒内圧 (P), 燃料噴射圧 (P_{fuel}) 及び筒内圧から算出した筒内温度 (T) と熱発生率 (dQ/dθ) を示す. プレ噴射の場合, 着火が早く, 圧縮終点圧・温度と最高筒内圧・温度ともに高くなっている. これはプレ噴射した燃料が先に燃焼することにより, 筒内温度が約 100℃ 上昇し, メイン噴射時の筒内雰囲気改善され, 良い燃焼ができたと考えられる. プレ噴射の場合に NOx が高く, CO, THC 及びスモークが低く出るのはこれが原因と考えられる. アフター噴射の場合, メイン噴射量が減少した分熱発生率が低下し, 筒内圧・温度は低くなっている. その後アフター噴射された燃料が再び燃焼している. アフター噴射による CO, THC 及びスモークの低減原因について, 小川らはメイン噴射量の減少によるスモーク生成量の抑制とアフター噴射の攪乱効果及びスモークの再燃焼にあると報告している⁴⁾. 今回の結果もこのような原因と考える. NOx の減少はアフター噴射によるタイミングリタード効果によるものと考えられる.

なお, 低負荷で燃料噴射圧が低くなっており, 高粘度の植物油の噴霧・燃焼に影響を与えられと考えられる. そのため, アシスト噴射とメイン噴射を同期させ, 最高燃料噴射圧を約 40MPa から約 60MPa に

Fig. 5 CO, THC, Smoke and NOx vs. Assist Injection ON / OFF

Fig. 6 P and P_{fuel} vs. Assist Injection ON / OFF

Fig. 7 T and dQ/dθ vs. Assist Injection ON / OFF

Fig. 8 Thermal efficiency

アップして、排ガス及び燃焼改善効果についても調べたが、実験を行った範囲ではプレ噴射とアフター噴射ほどの改善効果は認められなかった。

Fig.8 にアシスト噴射無しとアシスト噴射有りでの熱効率を示す。アシスト噴射無しよりアシスト噴射有りの場合、熱効率が若干増え、A重油並みの約31%となっている。

4. 2 改善効果におよぼすアシスト噴射期間(量)の影響

Fig.9 と Fig.10 にプレ噴射とアフター噴射の噴射期間(量)による改善効果への影響を示す。ここでアシスト噴射期間(量)は、1.5ms (出力換算で約25%負荷率の噴射量の1.5%相当)、2.0ms (出力換算で約25%負荷率の噴射量の3%相当)、2.5ms (出力換算で約25%負荷率の噴射量の6%相当)とした。

NOx については、プレ噴射の場合、噴射量によらずほぼ一定で、アフター噴射の場合、噴射量が多いほど減少している。

CO, THC 及びスモークについては、プレ噴射の場合、噴射量が少ないほうが望ましく、アフター噴射の場合、噴射量が多いほうが効果的である。

4. 3 改善効果におよぼすアシスト噴射時期の影響

Fig.11 と Fig.12 にプレ噴射とアフター噴射の噴射タイミングによる改善効果への影響を示す。

NOx については、プレ噴射の場合、噴射タイミングによらずほぼ一定で、アフター噴射の場合、噴射タイミングが遅いほど減少している。

CO, THC 及びスモークについては、プレ噴射の場合、BTDC20°以内でメイン噴射から離すのが効果的で、アフター噴射の場合、メイン噴射と約10°離れているATDC10°が望ましい。

5. まとめ

新たに開発したアシスト噴射により、低負荷での植物油のCO, THC 及びスモークを低減について実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

1) アシスト噴射により、低負荷での植物油のCO, THC 及びスモークを低減することが可能である。低減幅はアフター噴射効果約30%, プレ噴射効果50%以上である。

2) 噴射量について、プレ噴射の場合、少量噴射が望ましく、アフター噴射の場合、多量噴射が効果的である。

Fig. 9 CO, THC, Smoke and NOx vs. Pre-injection Period

Fig. 10 CO, THC, Smoke and NOx vs. After-injection Period

Fig. 11 CO, Smoke and NOx vs. Pre-injection Timing

Fig. 12 CO, Smoke and NOx vs. After-injection Timing

3) 噴射タイミングについて、プレ噴射はメイン噴射と離すのが効果的で、アフター噴射はメイン噴射から約 10°離すのが望ましい。

以上の結果からアシスト噴射により、低負荷での植物油の CO , THC 及びスモークの低減が可能であることが分かった。しかし、スモークが低減していても低負荷でエステル化していない植物油を使用すると、SOF 等の他の PM 成分が懸念されるが、その詳細は今後の課題として検討していきたい。

アシスト噴射は、エンジン回転数と負荷率に依存せず噴射圧力、噴射時期及び噴射パターンを制御することが可能である。また小型化が可能で、安価で比較的改造が少なく既存のエンジンへの適用が容易などのメリットがある。今後、このデータを活かし、自動制御の最適化についても検討していきたい。

謝辞

本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 西尾他 7 名, 第 79 回マリンエンジニアリング講演集, (2009), 19-20.
- 2) 徐他 3 名, 機械学会関東支部 16 期講演集, (2010), 371-372.
- 3) 西尾他 8 名, マリンエンジニアリング学会誌, Vol.45, No.5(2010), 120-126.
- 4) 小川他 4 名, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.1 (2008), 101-106.
- 5) 神谷他 5 名, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.2 (2007), 161-166.
- 6) 神谷他 5 名, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.3 (2009), 711-716.