

噴霧特性と噴孔内部流動に及ぼす燃料性状の影響

高橋 貴洸*1, 大垣 優太*1, 田端 道彦*2

Effect of Fuel Properties on Internal Nozzle Flow and Spray Characteristics

Takahiro TAKAHASHI*1, Yuta OGAKI*1 and Michihiko TABATA*2

In order to visualize the actual flow inside a diesel injection nozzle at high-pressure injection, a model nozzle which has nozzle hole diameter with real size was made of sapphire. Using the transparent nozzle and three kinds of fuel, the effects of the fuel properties on the internal flow in the nozzle hole were investigated. The spray characteristics were observed by high-speed shadowgraph photography under realistic conditions. As the result, the fuel which 90% distillation temperature and kinematic viscosity are low, amount of cavitation generation is increased. Therefore, the spray atomization and evaporation are promoted.

Keywords: Cavitation, Internal Nozzle Flow, Real Size Diesel Nozzle, Fuel Spray, Distillation Temperature, Fuel Viscosity, Bio Fuel, Gas Oil, Diesel Engine

1. はじめに

地球環境やエネルギー問題の観点から、ガソリン機関と比較して熱効率がよく、CO₂排出量の少ないディーゼル機関への軽油代替燃料の適用が試みられている。軽油代替燃料の一つとしてバイオ燃料が挙げられる。バイオ燃料は燃焼によって排出されるCO₂量を、原料である植物自身が光合成によって固定化するカーボンニュートラルの概念を有しており、再生可能な燃料として注目されている。しかし、バイオ燃料は軽油とは蒸発特性などの燃料性状が異なる。そのため、バイオ燃料のディーゼル機関への適合性を検討する必要がある。また、自動車用ディーゼル機関として成立させるには、厳しい排出ガス規制に対応しなければならない。そのため、クリーンかつ高効率なバイオディーゼル機関が求められている。

直接噴射式ディーゼル機関において、燃焼改善を図る上で、噴霧特性（微粒化、蒸発）が重要な因子である。加えて、噴霧の微粒化には、噴射ノズル噴孔内部に生じるキャビテーションが深く関わっていることが報告されており^{(1),(2)}、噴孔内部流動と噴霧特性との関係性を明確にすることが重要である。

しかし、現在のディーゼル機関では排出ガス特性改善のため、小噴孔径の噴射ノズルにより、燃料を高圧で噴射するため、微小なノズル噴孔内部では、高速かつキャビテーションを含んだ複雑な現象が起きている。そのため、噴孔内部流動については、従来の透明な拡大モデルによる定性的評価だけでは、十分な情報が得られないため、実寸の噴射ノズルの内部流動を計測する必要がある⁽³⁾。また、その結果はシミュレーションによる内部流動解析の検証にも有効である。

本研究では、噴孔内部流動と噴霧特性に着目し、高圧噴射にも耐えうるサファイア製実寸大の噴射ノズルを製作し、噴孔内部流動の可視化計測を試みた。また、実機と同じ条件下での燃料噴霧の蒸発をシャドウグラフ法により観察し、これらの噴孔内部流動と噴霧特性に及ぼす燃料性状の影響を調べた。

2. 供試燃料

供試燃料には、水素化処理を施したパラフィン系バイオ燃料(Bio fuel)、JIS2号軽油(Gas oil)、高セタン価燃料(Reference fuel, 以下 Ref. fuel)を使用した。図1にその燃料性状を示す。左図に示すよう軽油と比較し

原稿受付 2016年5月7日

*1 近畿大学大学院 システム工学研究科 システム工学専攻 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

*2 近畿大学工学部 機械工学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail tabata@hiro.kindai.ac.jp

連絡先: 田端道彦 (研究代表者)

て、バイオ燃料は 90%蒸留温度が低く、セタン価は同等である。また Ref. fuel は、逆に、軽油に 90%蒸留温度が近く、高いセタン価を持つ燃料である。

図 1 の右図は、各燃料の 90%蒸留温度と動粘度の関係を示してある。90%蒸留温度が高くなるに従い、動粘度が高くなっていることが分かる。

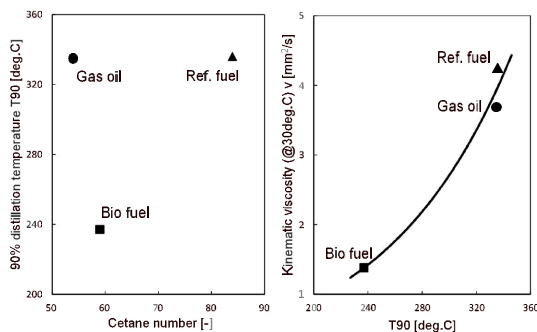


図 1. Fuel properties

3. 噴孔内部流動の計測

3.1 実寸大可視化噴射ノズルを用いた実験装置

図 2 にノズル噴孔内部の可視化に用いたサファイア製ノズル先端部を示す。噴孔径 0.12 [mm]、噴孔長さ 1.84 [mm]で、光学的可視化観察を容易に行うために 2 噴孔（噴射角 140 [deg.]）とした。実機噴射ノズル先端部分に研削加工を施し、サファイア製ノズル先端部を取り付けることで噴射ノズル先端部を可視化した。

図 3 にノズル噴孔内部流動可視化実験装置の概略を示す。本実験装置により、高温高圧場を形成することが可能であるが、高温高圧場での計測については、雰囲気の密度差による屈折率の変動により画面に揺らぎが生じ、良好な画像が得られなかった。したがって、今回の計測は雰囲気圧力を大気圧下で行った。

燃料噴射にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置を用い、噴射期間を 2.0 [ms] とした。噴孔内部流動の撮影には、光源に連続発振の Ar⁺レーザを用い、エンジンヘッド側面に対向して設置した石英ガラス窓を通して、拡大光学装置を装着した高速度カメラ(撮影速度 40,000 [fps])により、背景散乱光撮影を行った。

図 4 にノズル噴孔内部の可視化画像の一例を示す。図中(a)は図 2 に示した可視化ノズル及び軽油を用いた場合の噴射圧力の影響を示している。いずれも、針弁がフルリフトに達している期間の画像である。(b)は、実機ノズル噴孔部を 10 倍に拡大した(噴孔径 1.2 [mm]、噴孔長さ 8.43 [mm])アクリル製の透明なノズル及びテ

トラリンとテレピン油の混合燃料を使用した場合の結果である。なお、混合燃料の性状は軽油とほぼ同一である。レイノルズ相似則に基づき、10 倍モデルにおける噴射圧力 0.25, 0.5, 0.75 [MPa]は、それぞれ実機ノズルにおける噴射圧力 77, 154, 230 [MPa]に相当している。噴孔内で黒く写っているのがキャビテーションによる気泡が存在する領域であり、噴射圧力に差異があるが、実寸モデルでの噴孔内部の流動状態は、拡大モデルでのそれと定性的に一致していることが分かる。従って、本実験装置により実機ノズル内の流動状態を可視化可能であると考えられる。

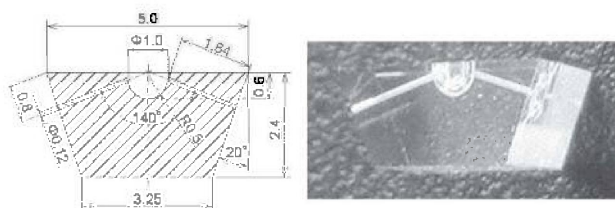


図 2. Configuration of transparent nozzle

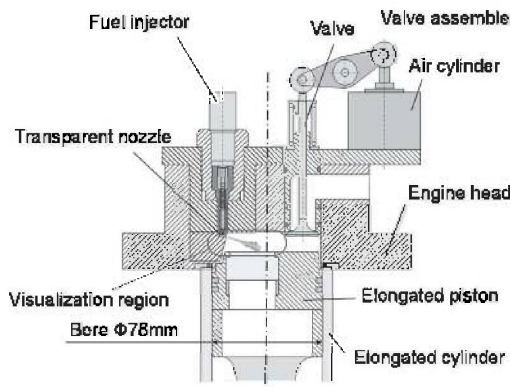


図 3. Experimental apparatus for visualization of internal flow in nozzle hole

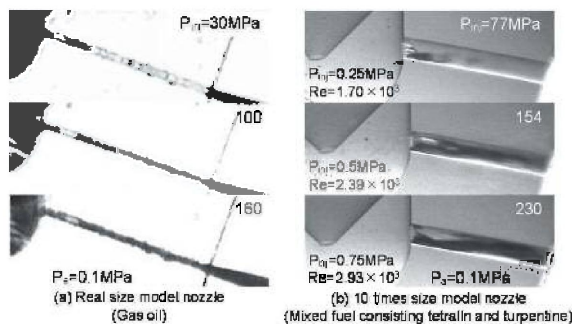


図 4. Comparative examples of internal flow in nozzle hole by difference of nozzle geometry

3.2 噴孔内部流動に及ぼす燃料性状の影響

図5に噴射圧力 $P_{inj}=30, 100$ [MPa]で、常温大気圧雰囲気中へ噴射した際の、噴射初期におけるノズル噴孔内部の可視化画像を示す。露光時間は、 0.5 [μs]である。また、サック内が黒く取得されているのは、サックの形状に起因する屈折率の差異によるものである。

図5より、 $P_{inj}=30$ [MPa]の場合、バイオ燃料は噴射開始直後 ($t=0.025$ [ms]) から噴孔入口付近でキャビテーションが発生し、時間の経過に伴いキャビテーション領域が拡大し、 $t=0.1$ [ms]には噴孔出口まで達している。軽油は、キャビテーションが $t=0.05$ [ms] で発生し、その領域が拡大する。しかし Ref. fuel は $t=0.075$ [ms]に噴孔入口付近でキャビテーションが発生しているが、その領域は噴孔出口まで達していない。これらの要因としては、バイオ燃料は 90% 蒸留温度が低く、動粘度が低いために、低噴射圧力でも容易に噴孔入口で圧力降下が生じる。それに対し、Ref. fuel は 90% 蒸留温度と動粘度が高く、圧力降下が抑制される。そのため、噴射初期においては、動粘度の増加に伴い噴孔入口でキャビテーションが発生する時期は遅延すると考えられる。

噴射圧力の高い $P_{inj}=100$ [MPa]の場合、 $t=0.05$ [ms]では、 90% 蒸留温度と動粘度の高い Ref. fuel では、キャビテーションが噴孔入口に発生しているのが確認できるが、バイオ燃料、軽油ではすでに噴孔出口近くにキャビテーション領域は拡大している。その後、 $t=0.075$ [ms]ではいずれの燃料もキャビテーション領域が噴孔出口へ達する。これは、噴射圧力の増加により、キャビテーションの発生が相対的にノズル噴孔内部流速の影響に支配されるためである。そのため、燃料性状の違いによる影響が少なくなり、キャビテーション領域が噴孔出口へ達する時期の差が相対的に縮小したものと考えられる。

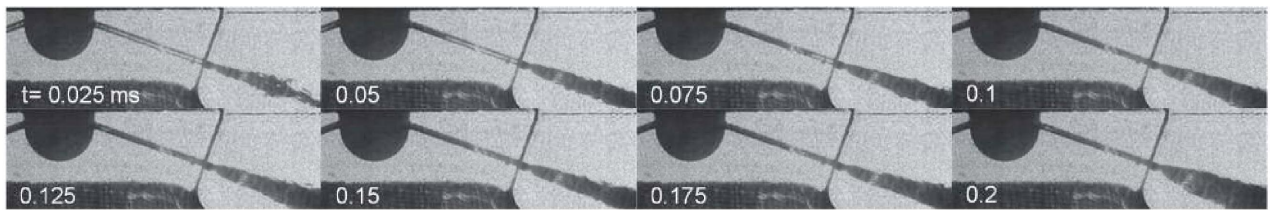
キャビテーションの発生状況を定量的に評価するため、噴孔内部領域のみを対象とし、画像輝度の平均値を算出した。その結果を図6に示す。なお、背景輝度の違いを取り除くため、噴射期間中の画像輝度の平均輝度の最大平均値で無次元化してある。図6より、 $P_{inj}=30$ [MPa]の場合、図5(a)に示した可視化画像からも明らかであるが、バイオ燃料は噴射早期に平均輝度が急激に低下しており、早期にキャビテーションが発生し、キャビテーション領域が急速に拡大することが分かる。軽油も早期に平均輝度が急激に低下しているが、その勾配はバイオ燃料よりも緩やかである。しか

し、Ref. fuel はバイオ燃料や軽油と比較して、平均輝度が緩やかに低下しており、また、噴射期間中の平均輝度が高く、キャビテーションの発生及び発達抑制されていることが分かる。噴孔内部の平均輝度が低下することは噴孔内部のキャビテーション発生量が多いことを示しており、燃料の 90% 蒸留温度が低く、動粘度が低いほど、キャビテーションの発生量が多くなることが定量的に分かる。

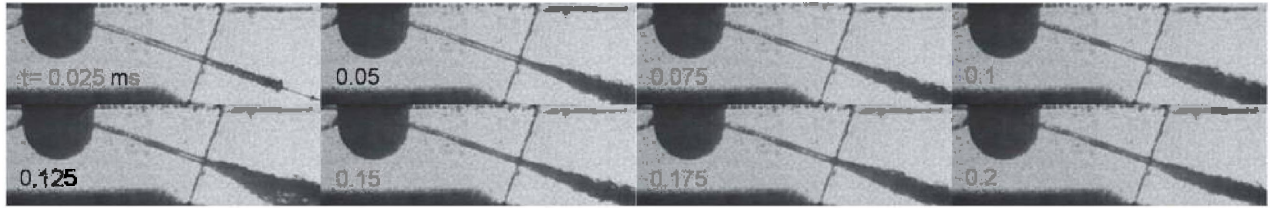
噴射圧力の高い $P_{inj}=100$ [MPa]の場合、キャビテーションの発生が相対的にノズル噴孔内部流速の影響に支配されるため、 $P_{inj}=30$ [MPa]と比較して、いずれの燃料も噴射早期からキャビテーションの発生量が多いため、平均輝度が急激に低下している。図5(b)に示した可視化画像からも明らかとなり、高圧噴射条件でも、 90% 蒸留温度と動粘度の大きい Ref. fuel が、バイオ燃料、軽油と比較して、噴孔内部の平均輝度が高く、明らかに、キャビテーション発生量自体は少ないことが分かる。高圧噴射においても、燃料の 90% 蒸留温度と動粘度の低下に伴い、キャビテーション発生量が多くなるものと考えられる。

噴孔出口と噴孔出口より 1 [mm] 離れた位置における噴霧外縁とのなす角を噴霧角と定義し、噴射ノズル出口の噴霧角を測定した結果を図7に示す。いずれの燃料も噴射圧力が高くなると噴射直後の噴霧角が大きくなっている。これは噴射圧力の増加に伴いキャビテーションの発生が促進されることにより、キャビテーション気泡を含んだ噴流が噴射されたためであると考えられる。図7(a)は、噴射圧力 $P_{inj}=30$ [MPa]の場合の結果である。 90% 蒸留温度と動粘度の高い軽油や Ref. fuel と比較して、バイオ燃料では、噴射後 $t=0.25$ [ms]で噴霧角が最大となっていることが分かる。これは、図6(a)に示すように、噴孔内部の平均輝度が $t=0.1$ [ms]で急激に下がっており、この時期にキャビテーション領域が噴孔全体に拡大し噴孔出口に達するために、微粒化現象が助長され、噴霧角が拡大したものと考えられる。 90% 蒸留温度と動粘度の高い Ref. fuel にはこのような顕著な噴霧角の変化は認められなかった。噴射後 $t=0.4$ [ms]以降は、キャビテーションの発生も定常化し、噴霧角はほぼ一定となり、その値はバイオ燃料が最も高いことが分かる。

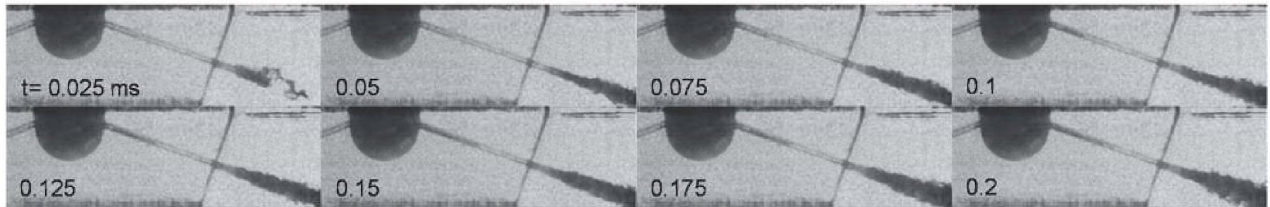
図7(b)は、噴射圧力 $P_{inj}=100$ [MPa]の結果である。噴射圧力の高い場合はいずれの燃料でも噴射後すぐに噴孔全体にキャビテーションが発生するため、さらに速い段階で噴霧角は定常状態に達する。定常状態に達し



Bio fuel

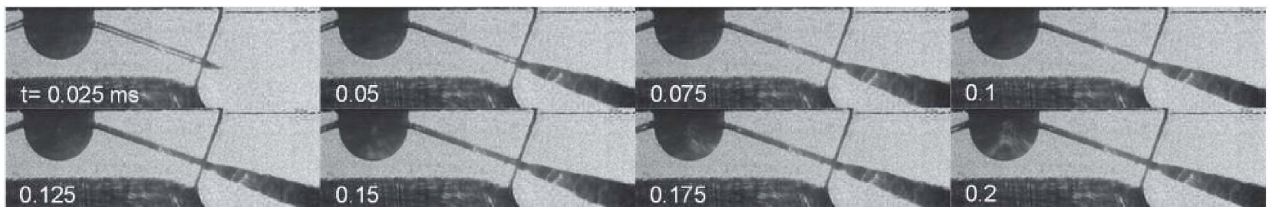


Gas oil

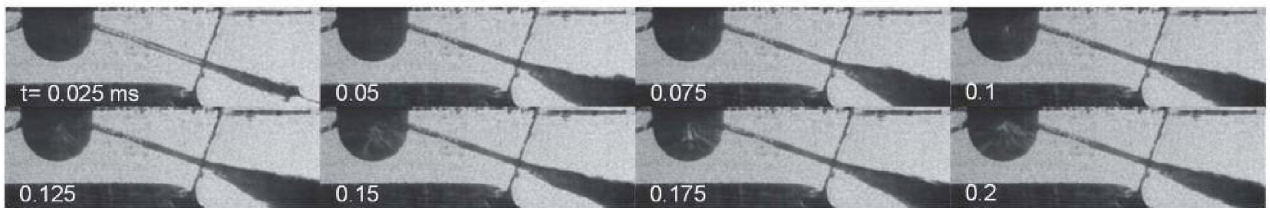


Ref. fuel

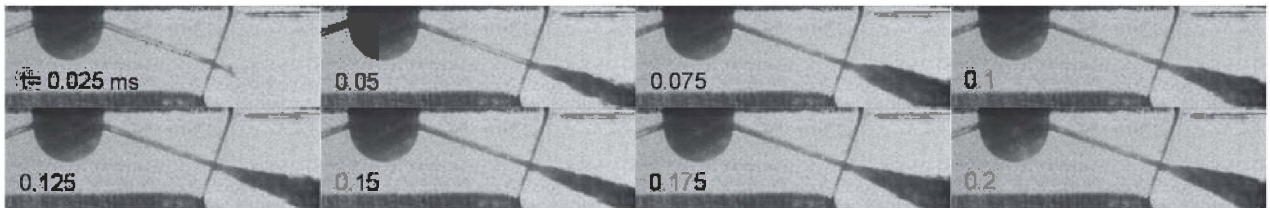
(a) $P_{inj}=30$ MPa



Bio fuel



Gas oil



Ref. fuel

(b) $P_{inj}=100$ MPa

图 5. Comparison of internal flow in the nozzle hole at initial stage of injection ($P_a=0.1$ MPa)

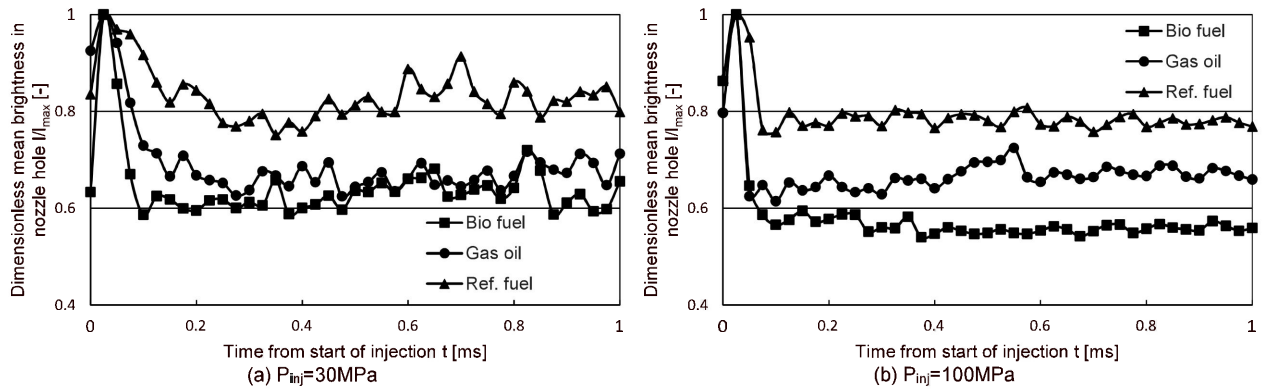


図 6. Effect of fuel properties on cavitation in the nozzle hole ($P_a = 0.1 \text{ MPa}$)

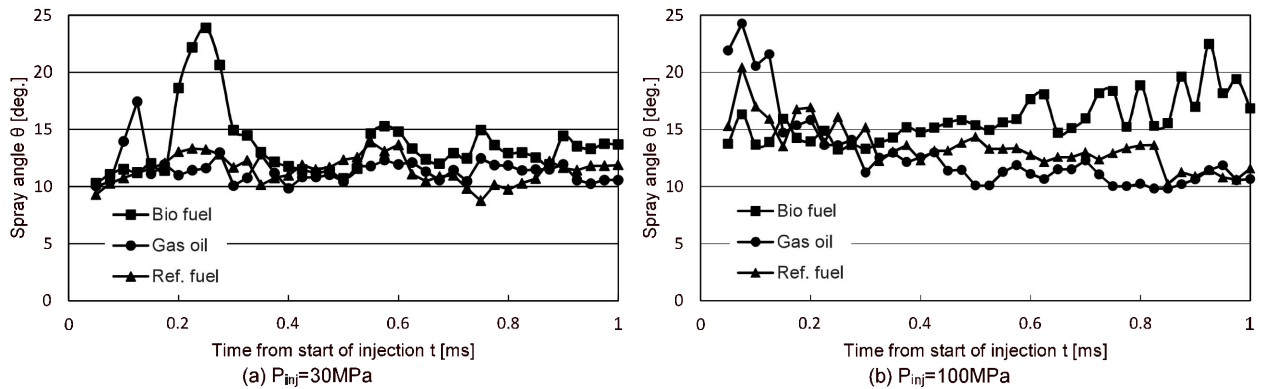


図 7. Effect of fuel properties on spray angle ($P_a = 0.1 \text{ MPa}$)

た噴霧角を比較すると、90%蒸留温度と動粘度の低いバイオ燃料が軽油、Ref. fuel と比較して噴霧角が大きくなる傾向があり、これは図 6 (b)の傾向と一致している。

4. 燃焼室内の燃料噴霧の観察

4.1 噴霧の高速シャドウグラフ撮影装置

図 8 に噴霧可視化実験装置の概略を示す。エアシリンダ駆動により吸気弁を開け、排気弁を閉じた状態でエンジンをモータ駆動する。ロータリーエンコーダからの信号を基に圧縮行程前に吸気弁を閉じることで圧縮する。電気ヒータによる吸気加熱(吸気管内温度 400 [K])及びシリンダ壁面加熱により実機ディーゼル雰囲気を模擬した。エンジンのボアは 78 [mm] 、ストローク 94 [mm] 、圧縮比 17.3 、回転数 600 [rpm] である。燃料噴射にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置を用いた。

噴霧蒸発過程はシャドウグラフ法により観察した。

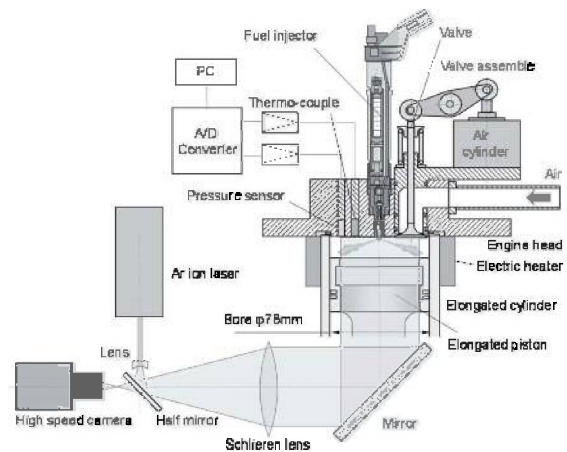


図 8 . Experimental apparatus for observation of evaporation process of spray

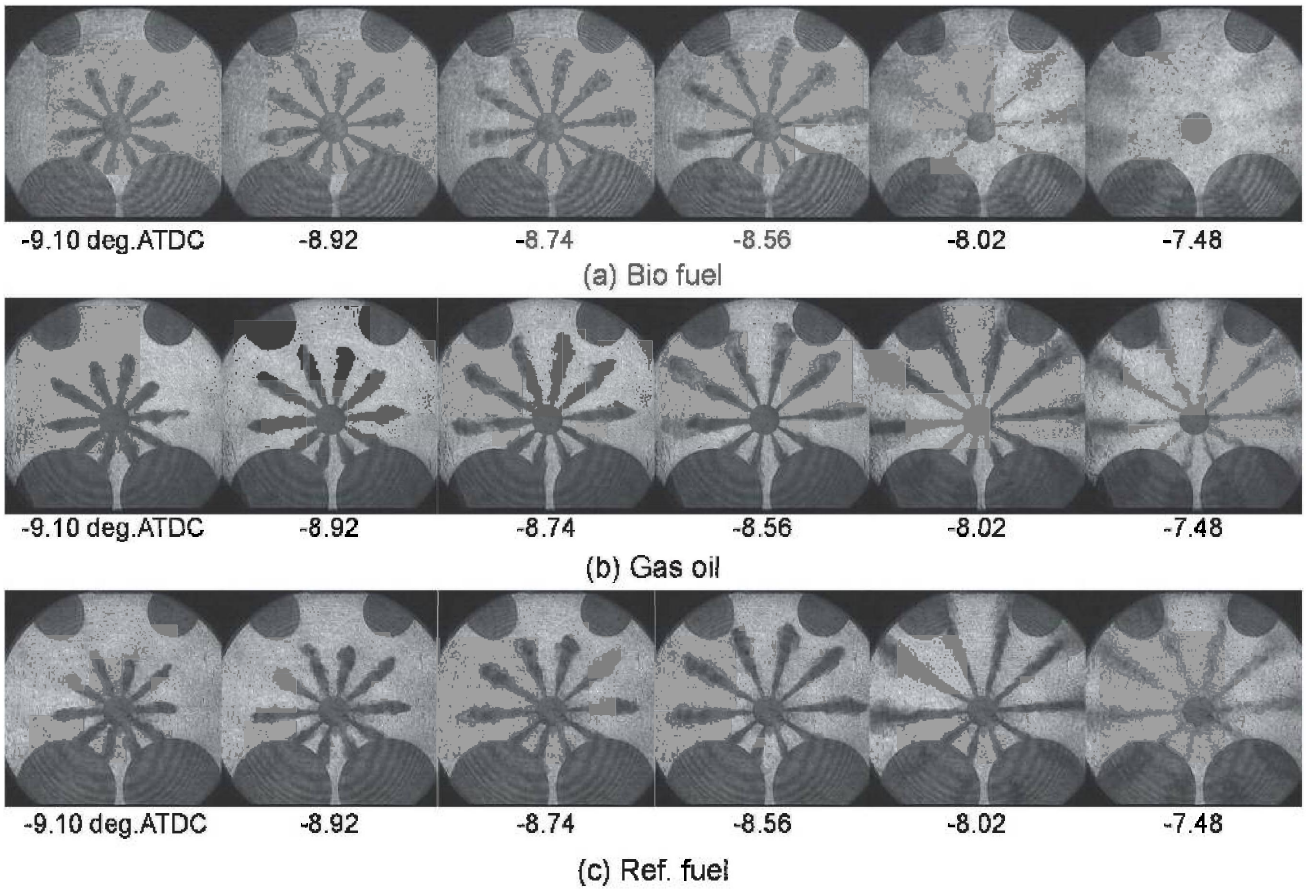


図 9. Effect of fuel properties on spray behavior

連続発振の Ar⁺レーザをシュリーレンレンズ($f=1,000$ [mm])により平行光束にし、ピストン下部に設置したミラーを介して、ピストンヘッドに設置したサファイアガラス窓より筒内に入射した。入射光は鏡面加工したエンジンヘッド下面で反射し折り返して、高速度カメラへ導いた。撮影速度は 20,000 [fps]とした。

4.2 噴霧特性に及ぼす燃料性状の影響

図 9 にはシャドウグラフ撮影結果を示す。なお噴射圧力 $P_{inj}=100$ [MPa]、噴射時期 $\theta_{inj}=-10$ [deg.ATDC]、噴射量 $Q_{inj}=13.65$ [mg]とした場合である。図 9 より、バイオ燃料は-8.92 [deg.ATDC] 付近で噴霧先端に蒸気（影の輝度が増加している領域）が出現し、シリンダ壁面に到達する前に噴霧はほとんど蒸発していることが分かる。軽油や Ref. fuel より蒸発が活発であることが明らかであり、これはバイオ燃料の 90%蒸留温度と動粘度が低いためキャビテーション発生量が多くなり、微粒化が促進されたこと、さらに、図 1 に示すように、バイオ燃料自体が蒸発性の高い燃料であること

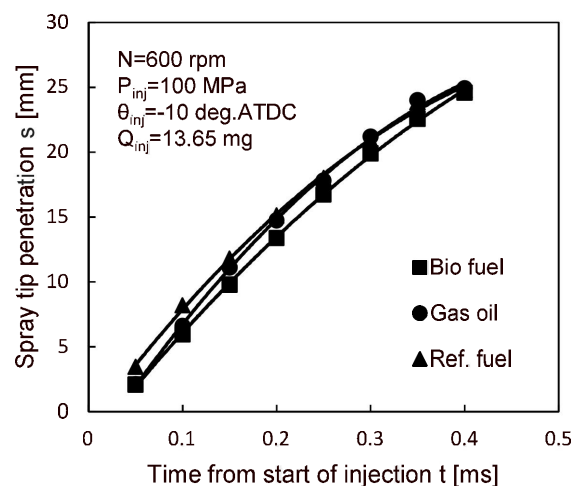


図 10. Effect of fuel properties on spray tip penetration

により蒸発が促進されたものと考えられる。

一方、90%蒸留温度に差異が少なく、バイオ燃料と比較して、蒸発性の劣る軽油と Ref. fuel を比較すると蒸気が出現する時期は-8.74 [deg.ATDC]で一致しているが、-8.56 [deg.ATDC]では、軽油の方が蒸気相の領域が広く蒸発が促進していることが分かる。これは軽油の動粘度が Ref. fuel より小さいため、微粒化が促進したためである。しかし、噴霧のペネトレーションに対して蒸発が追い付かず、Ref. fuel 同様シリンダ壁面に到達し、液膜が形成されることが分かる。

図 10 に撮影画像から噴霧先端到達距離を計測した結果を示す。噴霧先端の蒸発領域を含め計測しているため燃料により差異は少ないが、燃料の 90%蒸留温度が低く、動粘度が低い方から、バイオ燃料、軽油、Ref. fuel の順に噴霧到達距離が長くなる傾向にあることが分かる。これらは、90%蒸留温度と動粘度の低下に起因して、キャビテーション発生量が増加し、微粒化が促進されるという噴射ノズル内部流動の観察結果とよく一致している。

5. まとめ

燃料性状の異なるバイオ燃料、軽油、高セタン価燃料を用い、噴孔内部流動と噴霧特性に及ぼす燃料性状の影響を背景散乱および、シャドウグラフ高速撮影法で調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 90%蒸留温度が高く、動粘度が高い燃料ほど、噴孔内部にキャビテーションの発生が抑制される。
- (2) 90%蒸留温度が高く、動粘度の高い燃料ほどキャビテーション発生が抑制される効果は、噴射圧力の増加により相対的に減少する。
- (3) キャビテーションの発生により、噴霧角は増加する傾向にある。
- (4) 燃焼室内での噴霧を計測した結果、90%蒸留温度が低く、動粘度が低い燃料ほど、微粒化が促進され、噴霧先端部の噴霧蒸発が促進される。このことは、噴射ノズルの噴孔内部流動でのキャビテーションの発生が多くなる傾向と非常によく一致する。

参考文献

- (1) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之, “液体噴流の微粒化過程とノズル内の流れ”, 日本機械学会論文集(B編), 56 巻, 528 号 (1990-8), pp.2519-2525.
- (2) Chaves,H.,Knapp,M. and Kubitzek,A, “Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzles”, SAE Paper, No. 950290 (1995), pp.645-657.
- (3) 林朋博, 他 3 名, “等倍モデルによるディーゼルノズル内流れと噴霧燃焼の可視化解析”, 自動車技術会論文集, 43 巻, 6 号 (2012), pp.1251-1256.