C133 ディーゼル機関における蒸発噴霧液相の計測

(株) いすゞ中央研究所 横田克彦○、張瓏

Measurement of the Liquid Phase of Evaporating Spray in a Diesel Engine

Katsuhiko YOKOTA*, Long ZHANG*

This paper introduced a very simple method to measure the liquid phase of spray in an optically accessible DI diesel engine. Particular attention was paid to easy and practical usage. As a result, a less expensive 4W argon laser was used as the beam source and an E-10 high speed camera was used for continuously observing the elastic-scatter liquid phase image. Through this method, the effects of injection pressure, nozzle specification, intake air temperature and boost on the liquid phase penetration before ignition were investigated. Some results were reported in this paper.

1. まえがき

小型高速ディーゼルエンジンの低公害、高性能化を図るには噴射系や燃焼室形状などの仕様が大きく影響し、両者の相互作用が重要であり、とくに噴霧の壁面への衝突という観点から、衝突を支配する燃料噴霧の液相部長さの挙動を知ることが大切である。例えば、低速、低負荷状態では燃焼室

壁への噴霧液相部の衝突防止がHCの排出を減らす上で重要であり、高速、高負荷では燃焼室形状、スワールと噴霧との適合性がスモークの排出を減らす上で需要である。それゆえ、更なる燃焼改善で排ガスを低減するには、実際のエンジン内での蒸発しつつある噴霧液相部の到達距離を計測し、理解する必要がある。今迄もこれらに関連した多くの研究^{1) 2) 3)}がなされているが、ほとんどが蒸発噴霧の液相部の挙動の現象を理解することに主目的がおかれていた。

そこで、筆者らは排出ガスの低減の観点から、可視化エンジン^{5) 6) 7)}を用いて、実機の圧縮比に近い状態で、レーザービーム散乱像を利用した実用的で簡単な蒸発噴霧の液相部長さの計測法を確立した。レーザービームの光源は4Wのアルゴンレーザで、液相の散乱像はE10高速度カメラで記録した。本報では、噴射ノズル噴孔径、噴射圧力、吸入空気圧と温度を変え、これらが蒸発噴霧の液相部長さに及ぼす影響について研究した。

2. 光学的システムと計測法

使用エンジンは表1に示すように、ベースは単気筒直噴式4弁のボア112mmの無過給エンジンである。ピストン頂面には透明な石英窓が装着され、噴射系は仕様変更が容易なコモンレール型噴射システムが使われた。なお、吸入空気圧と温度も独立して制御され、過給エンジン化した時の特性も観察した。従来の方法では圧縮比が低くなって実機エンジンのそれに近づける事が難しかったので、今回はそれを解決し、

Table1 Engine Specifications

Type	4 valves NA DI diesel
Bore/Stroke	112/110mm
Chamber shape	Dish type (φ 54mm)
Displacement	1.084l
Injection system	Common rail
Needle opening pressure	10MPa

Fig.1 Schematic of optical-access engine and optical layout for liquid phase penetration measurement

*Isuzu Advanced Engineering Center, Ltd., Tsuchidana-8, Fujisawa-city, 252

更に安価なレーザーでも使えるような実用的方法を提案した。図1にその概略を示す。ピストントップ部には燃焼室側壁を切り欠いて貼り付けられた反射鏡が設けられている。レーザービーム又はレーザーシートは延長ピストンの内側に設置された反射鏡で反射しピストン上方に進み、ピストントップ部の反射鏡で再び曲げられ、噴霧軸の一つに沿って燃焼室内を進んでいく。図2にはその詳細を示した。この結果、圧縮比は実機エンジンの着火遅れを実現する値に設定ができ、レーザービームにも特別な処置を施すことなく、連続的に蒸発噴霧の液相部散乱像を計測することができた。燃焼室壁面から噴射ノズル噴孔までの光路上に噴霧液滴が存在した場合には散乱光を生じ、気体が存在している場合にはビームは気体中を通かすために、結果として燃料噴霧の液相部のみを観察する事ができる。ただし、ピストントップ上の反射鏡はピストンと共に動くので、計測領域には限界があり、それは上死点前10度から上死点后10度であるとチェックされた。レーザービームの直径は約4mmで、撮影した16mmフィルムは画像処理装置(NAC ID8000)に取り込み、画面上でのノズル先端から燃焼室壁までの距離と、ノズル先端から液相部先端までの距離の比を求め、実際の燃焼室径から噴霧液相部長さを算出した。その液相部長さの算出には連続4サイクルの平均を用いた。液相部長さというのは、図3に示したのは画像の一例であるが、噴霧部分を拡大し、さらにこれを画像処理ソフトを用いて輪郭抽出(シェリーレン写真のような効果になる)を行った。今回の液相部先端は微粒化された噴霧液滴群の密度変化の大きい部分(明確な差が認識可能)を指して長さと呼んでいる。スレッショールドレベルの問題になり、色々とは見方はあるが今回はこの方法によった。仕様比較等では条件が一定していれば問題はないと思う。

3. エンジン運転条件

表2に示した。使用燃料はJIS 2号軽油であるが、本可視化エンジンの圧縮比は単気筒の熱損失が多く、着火遅れを実機のそれに近づけるのに大き目の圧縮比2.1に設定した。エンジン冷却水温度と潤滑油温度はそれぞれ蒸気や電気ヒータによって83℃と50℃に加熱された。噴射開始時期は高速度カメラのフィルムがある長さを過ぎた時に、噴射開始が制御され、4連続サイクルが撮影された。噴射始めは2BTDC一定とした。吸入空気温度は29、60℃を試験したが、筒内圧力はほぼ一定になり、上死点での筒内温度が高くなったことを確認した。さらに、吸入空気ブースト圧も変えたが、筒内平均温度は上死点で若干高くなったものの筒内圧力は相当高くなった。噴射圧力を3段階で変更したが、噴射率は噴射率メータで計測された。噴射率は噴射圧の増大と共に増加し、噴孔径の減少と共に低下する。噴射期間は高コモンレール圧では幾分短くなったが、噴射期間を着火遅れよりも長く取っているため、圧力による噴射期間の差異は今後の結果には殆ど影響しない。噴射ノズルはミニサック(0.37mm³)、L/D4、噴射角15.5度、噴孔径は7噴孔で0.14と0.20mmの2種類を用いた。最後に、高速度カメラは毎秒6000コマにフィルムスピードを設定し、KODAK 7250フィルムを用いた。撮影された一例を図3に示した。

4. 試験結果と考察

噴射ノズル噴孔径の噴霧液相部長さへの影響を図4に示した。同時に噴射圧力も変更した。これらの図のプロット点

Fig.2 Details of the laser-beam arrangement inside the combustion chamber

Fig.3 Images of the liquid penetration for 0.14x7 nozzle, injection pressure is 20MPa for upper row and 80MPa for lower row

Table 2 Operating Conditions

Engine speed	1000rpm
Compression ratio	2.1
Port swirl ratio	2.4
Injection timing	-2 degrees BTDC
Injection pressures	20, 50 and 80MPa
Command pulse duration	1.003ms
Intake temperatures	29 and 60 °C
Intake pressures	1.033, 1.30 and 1.56 bar
Water temperature	83 °C
Oil temperature	50 °C

Fig.4 Effect of nozzle hole diameter on liquid penetration

は4回連続したサイクルの平均値であり、誤差範囲も示した。これらの変動はサイクル間の変動とフィルムのコマ速度の限界に起因すると考えている。これらの図から噴孔径を小さくすると噴霧液相部長さは短くなると言える。噴孔径を小さくすると微粒化が良くなり、そのために液相部が短くなったと考えられる。噴射圧が20, 50MPaの初期の噴霧発達状態を観察すると、小噴孔径ほど噴霧液相部の展開が速いと見ることができる。これは噴射ノズルサック内の圧力上昇の差に起因するものと考えられ、コモンレール圧が低いほどサック内圧力上昇率が高くなる。噴射圧の影響を図5に示す。2種類の噴射ノズルでその影響を調査した。噴射圧を上げていくと噴霧液相部の到達距離の展開は速く、その最大値への到達時間が早くなる。しかしながら、その液相部最大長さは噴射圧の影響を殆ど受けず、変わらない結果となっている。噴射圧を上げるとということは噴射速度を速めることになり、もし平均粒径が同じならば液相部の到達距離は大きくなる。一方、ザウター平均径のような粒子の平均径は噴射圧の上昇とともに小さくなり⁸⁾、このことは粒子の蒸発を促進し、到達距離を抑える事になり、これらの両者の結果として噴射圧によって液相部長さが影響を受けなかった、と考えられる。

次に、吸入空気ブースト圧の影響を調査した。高いブースト圧は噴射圧力に無関係に、液相部長さを著しく短縮させることが分かった。図6にそのレーザビーム画像を示し、図7に液相部長さを示した。高ブースト圧は筒内圧を高くし、筒内の空気密度も高くするので、噴霧の微粒化を促進するとともに、噴霧液相部にとっては大きな抵抗になる。つまり、これらの高密度空気、微細な微粒化は噴霧液相部の到達距離を短くする方向に働く。吸入空気温度の液相部長さに及ぼす影響を図8に示した。吸入空気温度を高くしても上死点での筒内圧力にはほとんど影響しないが、上死点での筒内温度は高くなる。上死点において空気密度が小さくなったにもかかわらず、高温周囲空気によって増大した噴霧の蒸発速度のために、噴霧液相部長さは短くなった。噴射圧が高いと吸入空気温度の影響は小さくなるが、噴射量が増大し、噴霧速度が大きくなり、これらはいずれもが低圧噴射に比べて温度の効果を弱める方向に働いている。

従来の研究結果^{1) 2) 4)}と比較すると、今回の測定装置は全くの別の方法であるが、噴射ノズル噴孔径¹⁾や噴射圧力²⁾、吸入空気温度⁴⁾や吸入空気ブースト圧、などの噴霧液相部の最大長さに及ぼす影響は従来にいられていることと良く一致している。このことは今回の簡単で実用的な蒸発噴霧液相部の長さ計測法が非常に有用であることを示している。最後に、蒸発噴霧の液相部長さと噴射ノズル噴孔径との関係を、噴射圧をパラメータにして図9に示した。噴射圧によって微少の差はあるが、噴射ノズル噴孔径との関連性が強いことが分かる。つまり、蒸発噴霧の液相部長さは噴孔径によって支配されているといっても過言ではない。

Fig.5 Effect of Injection pressure on liquid penetration

Fig.7 Effect of inlet air pressure

5. まとめ

蒸発噴霧の液相部の長さを計測する、非常に簡単で実用的な方法が提案された。従来の光学的な、延長ピストンを用いた可視化エンジンをベースにして、二つの反射鏡を用いた安価なレーザービームを噴霧軸に沿って入射させることで、連続的に噴霧液相部の散乱光を撮影できた。さらに、実機エンジンの圧縮比を再現でき、着火遅れを実機並にした状態で撮影された。これらの手法を用いて、噴射ノズル噴孔径、噴射圧力や吸入空気温度と圧力などの広範囲なパラメータ実験が行われた。これらの噴霧液相部の長さ計測結果から以下のような事が言える。

1. 噴射ノズル噴孔径を小さくしていくと、蒸発噴霧の液相部の最大長さは短くなる。さらに、小噴孔径化は、噴射圧力が低い状態だと初期の噴霧液相部の到達距離を大きくする。
2. 噴霧到達距離は噴射圧の上昇とともに増加する。しかしながら、その最大到達距離は噴射圧力に関係なくほぼ一定である。これは噴射圧力が增大すると噴射速度は確かに大きくなり到達距離を増やす方向に働くが、平均粒径が小さくなるので、これは到達距離を短くする方向に働き、両者が相殺するものと考えられる。
3. 吸入空気の高ブースト圧化は上死点での筒内圧力と空気密度を高めるので、液相部長さは短くなる。
4. 吸入空気の高温化は高い上死点温度の影響で、噴霧液相部長さは短くなる。しかし、この効果は噴射圧力が高い時や、噴射量が多い時には軽減される。

6. 参考文献

1. K.R.Browne, et; Fuel Property Effects on Fuel/Air Mixing in a Experimental Diesel Engine, SAE Paper 860223, 1986
2. T.Kamimoto, et; Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a Rapid Compression Machine to Simulate Diesel Flames, SAE Paper 871610, 1987
3. G.R.Bower, et; The Effect of Split Injection on Fuel Distribution in an Engine-Fed Combustion Chamber, SAE Paper 930864, 1993
4. C.Espey, et; The Effect of TDC Temperature and Density on the Liquid-Phase Fuel Penetration in a DI Diesel engine, SAE Paper 952456, 1995
5. L.Zhang, et; An Analysis of the Combustion of a DI Diesel Engine by Photograph Processing, SAE Paper 930594, 1993
6. L.Zhang, et; An Observation and Analysis of the combustion under Supercharging on a DI Diesel Engine, 940844, 1994
7. L.Zhang, et; A Study of the Effects of Chamber Geometries on Flame Behavior in a DI Diesel Engine, SAE Paper 952515, 1995
8. T.Minami, et; Analysis of Fuel Characteristics and Combustion Phenomena under High Pressure Fuel Injection, SAE Paper 900438, 1990

Fig. 8 Effect of inlet air temperature on the liquid phase penetration

Fig. 6 Images of liquid penetration at different inlet air temperature and boost pressure at 0.14x7 nozzle

Fig. 9 Maximum liquid phase penetration vs nozzle hole diameter