

ディーゼル噴霧の燃焼室底面付着液膜の計測

Analysis of Combustion Chamber Bottom Wetting on Diesel Spray

西島 義明 浅海 靖男 青柳 友三
 (Yoshiaki NISHIJIMA) (Yasuo ASAUMI) (Yuzo AOYAGI)
 (株)新エイシーイー
 (New ACE Institute Co., LTD.)

It is able to realize very low NOx emissions through Premixed lean diesel combustion (PREDIC) by application of the early fuel injection. Another consequence of such early injection is an increase in the amount of fuel spray adhering the cylinder wall or the bottom of combustion chamber. The phenomena draw higher smoke and THC emissions. This paper deals with quantitative analysis of the mechanism of fuel adhesion on the bottom of combustion chamber in PREDIC engine. The experiments were carried out in a visualization engine that had a remodeled enlarged piston with an optical access. The method of laser induced fluorescence (LIF) was applied with Nd:YAG laser for photographing fuel film on the bottom of combustion chamber under the condition of engine operation.

Key Words : Diesel Engine, Fuel Injection, Fuel Adhesion, Fuel Film, Spray Characteristics, LIF

1. まえがき

希薄予混合圧縮着火燃焼は大幅なNOx低減が可能であり⁽¹⁾⁽²⁾、早期噴射による希薄予混合ディーゼル燃焼(以下PREDIC)の研究⁽³⁾が行われてきた。しかし、PREDICには早期噴射によるシリンダ壁面付着燃料が要因と考えられる燃費の悪化や、THC排出量の増加などの問題点がある⁽⁴⁾。著者ら⁽⁵⁾は、シリンダ壁面に付着した燃料が燃焼に寄与することなく未燃分として排出される現象を解析し報告してきた。早期噴射時の筒内壁面への燃料付着については、原田ら⁽⁶⁾の研究においてボトムビュータイプの可視化エンジンでのシャドウグラフによる燃焼観察結果から、スモークやTHC発生の一つの要因として燃焼室底面への付着を示唆しているが、燃料が付着してから気化するまでの時間的推移や定量的な付着量のような情報が得られていない。このような状況から本研究では、定性的・定量的な把握をするため、レーザ誘起蛍光法(以下LIF)を応用した付着燃料計測手法を開発した。すなわち、ボトムビュータイプ可視化エンジンの伸張ピストン内部に光学系を組み込み、エンジン運転状態での燃料付着の解析を試み、付着燃料油膜厚さが蛍光強度に比例することを利用して油膜厚さを算出した。

2. 実験装置と実験条件

図1に燃料付着を観察するために使用した可視化エンジン、噴射系、光学系概略を、表1にその主要諸元を示す。可視化エンジンは排気量2リッタの単気筒エンジンを改造したものである。観察方向はボトムビュータイプで、伸張ピストン頂面に合

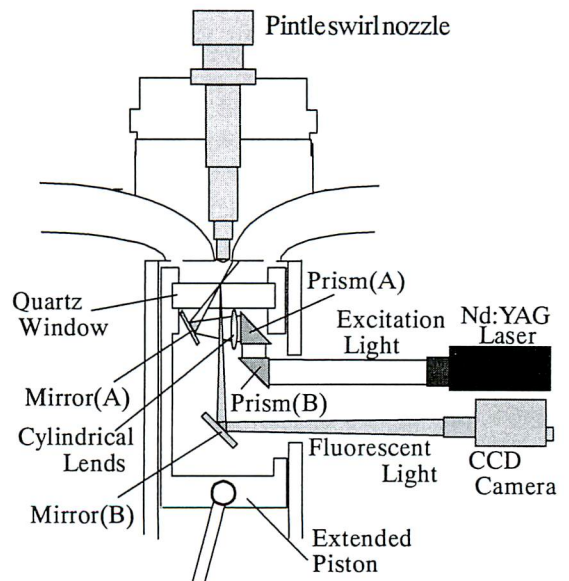


Fig.1 Schema of visualization engines

Table 1 Main specifications

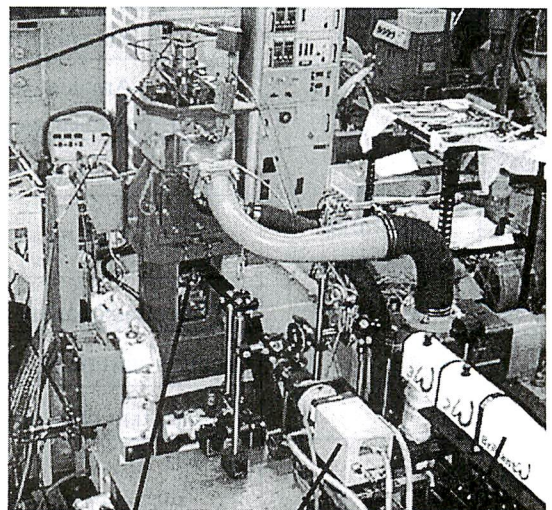
Engine Spec.	Bore × Stroke (mm)	135 × 140
	Displacement (m ³)	2.004 × 10 ⁻³
	Compression ratio	16.5
	Piston combustion chamber (mm)	Shallow dish φ80, depth 23 (View size φ70)
	Swirl ratio	0.5
	Injection system	Accumulator type
	Injector	Center
	Nozzle	Pintle swirl Hole φ2, pintle φ1.9
Optical Spec.	Laser Wave length (nm)	Nd:YAG λ _{EX} : 355
	Camera	II-CCD
	Band pass filter (nm)	λ _{TR} : 400 ± 20 Full width at half maximum : 40

成石英ガラス製の観察窓が装着されている。なお、燃料付着部位としてはシリンダライナ壁面とピストン燃焼室底面が考えられるが、本研究で対象とした燃料噴霧の形状と噴射時期の関係から、主な燃料付着部位はピストン燃焼室底面と判断しこの部分を観察した。観察窓の視野は石英ガラス保持部の大きさの制約からφ70mmである。さらにレーザ光導入のために伸張ピストン内部に専用の光学系ユニットを装着した。このユニットはプリズム(A)、シリンドリカルレンズおよび反射鏡(A)で構成され、ピストンと共に上下動する。エンジン本体側にはプリズム(B)と反射鏡(B)があり、これらはピストンの動きとは関係なく固定されている。光源にはパルスNd:YAGレーザ(QUANTEL製Brilliant W)の第3高調波(波長λ=355nm)を使用した。燃料噴射装置は高圧蓄圧式を使用し、シリンダ中心軸上にピントル型スワールノズルを装着した。

燃料にはn-Tridecaneを使用し、蛍光剤であるTMPD(N,N,N',N'tetramethyl-p-phenylene diamine)を1mass%添加した。吸入気体としては燃焼が起こらないようにポンペからN₂ガスを供給した。撮影にはイメージインテンシファイア付きのCCDカメラ(Princeton Instruments製)を用い、透過波長λ_{TR}=400nmのバンドパスフィルタを使用した。CCDカメラの制御と撮影した画像の処理にはPrinceton Instruments製のWinView32 Version2-3-2.5を用いた。図2に可視化エンジンと光学系の外観写真を示す。図3はピストン全景と内部に取り

付けられた光学系ユニットをピストン下方から撮影した外観写真である。

次に励起光セットと蛍光撮影について述べる。エンジン側面から照射されたレーザ光は、固定プリズム(B)によってピストン内部で上方へ反射され、ユニット内のプリズム(A)に入射される。プリズム(A)(B)間のレーザ光路をピストン摺動方向と平行にし、ピストンの上下動によってプリズム(A)(B)間



Extended piston CCD camera Nd:YAG Laser
Fig. 2 External appearance of engine with optical access

の距離が変動しても光軸への影響が無いように設定した。プリズム (A) に入射されたレーザー光はシリンドリカルレンズを通過し、観察窓上面と平行なシート光に絞られ、反射鏡 (A) へ向かう。反射鏡 (A) によってピストン観察窓の上面へ向けて反射される。この際、測定対象の油膜が形成される観察窓上面 (燃焼室底面) でレーザーシート光が集光するように、光路長とシリンドリカルレンズの焦点距離を設定した。

形成されたシート光集光部は観察窓中心付近から燃焼室外径までの 1 本の線をなし、この領域が燃料油膜の測定部になる。レーザー光を過度に集光させると、測定時に燃焼室底面の燃料がレーザー光のエネルギーによって燃焼するため、集光部でのシート光の厚さを約 1 mm に調整した。さらにこのシート光がピストンのガラス面に対して斜め下方から入射するように反射鏡 (A) をセットした。これには二つの目的がある。一つはピストン下方から観察する際にレーザー光が燃料油膜を照射している位置を判別し易くすること。他は燃料油膜を透過したレーザー光によって、ピストン上方に存在する噴霧液滴が励

起され撮影上のノイズとなるため、この蛍光発光が測定位置の真上で起こらないようにすることである。こうして得られた油膜からの蛍光を反射鏡 (B) を介して CCD カメラによって撮影した。

表 2 にエンジン運転条件と撮影条件を示す。筒内の温度履歴が回転速度に大きくは依存しないこと、およびピストン内の光学系ユニットの強度を考慮し、エンジン回転速度は 300 rpm とした。蛍光剤 TMPD を 1 mass% 添加した燃料としての n-Tridecane は、ピントル型スワールノズルによって噴射圧 100 MPa、噴射量 60 mm³/st の条件で噴射した。噴射

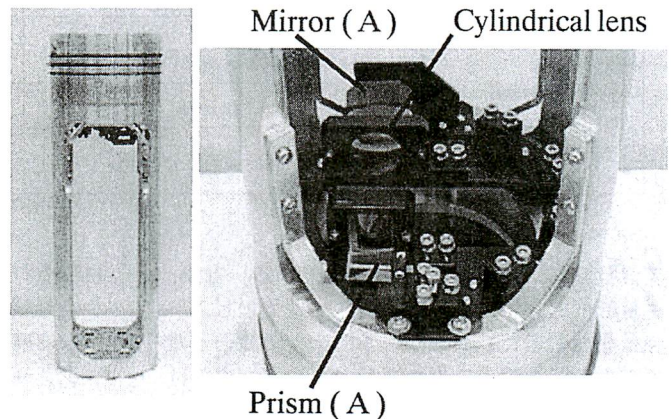


Fig. 3 External appearance of piston (left) and optical unit inside piston viewed from bottom (right)

Table 2 Test conditions

Engine operating condition	Engine speed(rpm)	300
	Ambient gas (molecular weight)	N ₂ (28)
	Fuel	n-Tridecane (n-C ₁₃ H ₂₈)
	Additives	TMPD (1mass%) (N,N,N',N'-tetramethyl-p-phenylene diamine)
	Injection quantity (mm ³ /st)	60
	Injection start timing(deg.ATDC)	-120,-80
	Injection pressure (MPa)	100
Photographing condition	Photographing timing (deg.ATDC)	-178,-109,-73,-44,-15,+73 (at -120 Inj. start) -81.5,-63,-50.5,-20,+17 (at -80 Inj. Start)
	Exposure time (μ sec)	10

開始時期は -120° ATDC と -80° ATDC である。撮影時期は噴霧の拡がりとピストンの挙動を考慮し、噴射開始からピストンが上死点に達するまでの間の数点とした。また、圧縮にともなう温度の上昇によって燃焼室底面に付着した燃料が蒸発すると思われる上死点通過後においても、撮影を行った。いずれの場合も露光時間は $10 \mu\text{sec.}$ である。

3. 実験結果

3.1 噴霧の拡がり と ピストン 挙動

エンジン実験に先立って、噴霧の拡がり と ピストン 挙動 の 関 係 に つ い て 調 べ た 。 図 4 に N_2 ガス を 0.1MPa で 充 填 し た 定 容 容 器 内 に ピ ン ト ル 型 ス ワ ー ル ノ ズ ル を 用 い て n -Tridecane を 100MPa で 噴 射 し、噴霧軸に直角方向から撮影した噴霧像を示す。図5は先端到達距離の時間経過である。軸方向到達距離は 60mm を 過 ぎ た あ た り で ほ ぼ 一 定 値 に なる。燃焼室底面がこの位置まで上昇してくる時期を計算すると、図5に直線で示す -60° ATDC 程度になる。この噴霧の時間推移と撮影時期を模式的に図6と図7に示す。() が撮影時期である。

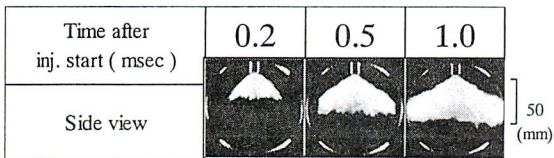


Fig.4 Fuel spray pattern

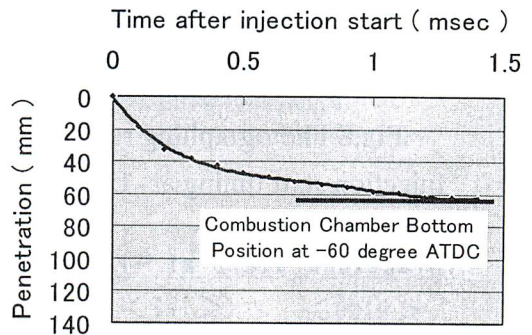


Fig.5 spray penetration

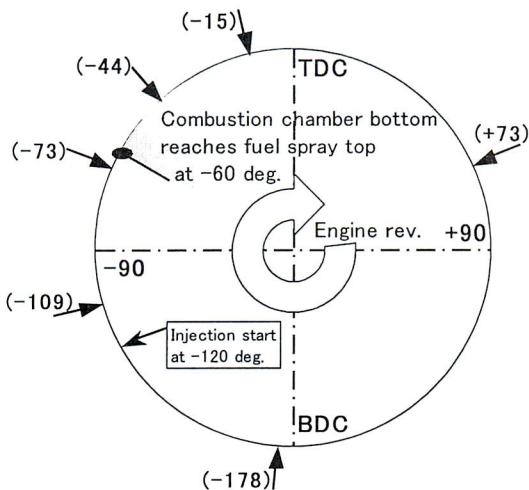


Fig.6 Injection and photographing timing (Inj. start at -120 deg. ATDC)

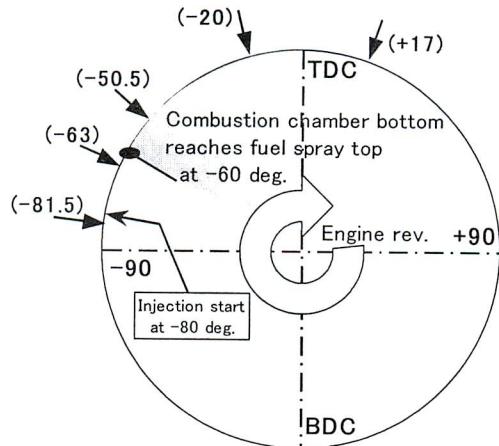


Fig.7 Injection and photographing timing (Inj. start at -80 deg. ATDC)

3.3 油膜のピストンクランク角に対する推移

図9に油膜撮影画像をエンジンクランク角との対比で示す。上段が噴射時期 -120° ATDC, 下段が噴射時期 -80° ATDCの場合である。

燃料噴射開始後で撮影時期 -109° ATDCと撮影時期 -63° ATDCの画像については, 双方の噴射時期の場合ともに蛍光発光が認められる。これは, ピスト

ン上方に存在する燃料噴霧が, 観察窓を通過して拡がっていくレーザー光によって発光しているものと考えられる。ただし, 撮影時期 -63° ATDCの画像については, 微弱ではあるが測定位置における発光が認められ, 噴霧の一部が燃焼室底面に付着し始めているものと思われる。

撮影時期 -44° ATDCと撮影時期 -50.5° ATDCの画像では, 白矢印の測定位置に輝度の高い直線部分が認められ, 燃焼室底面に燃料油膜が発生しているこ

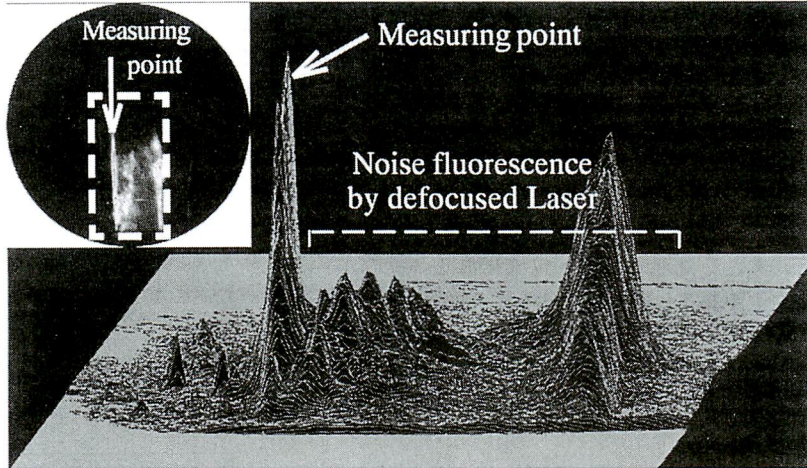


Fig.8 Photographing result of fuel film on combustion chamber bottom
Injection start timing at -120deg.ATD , Photographing timing at -44deg.ATDC

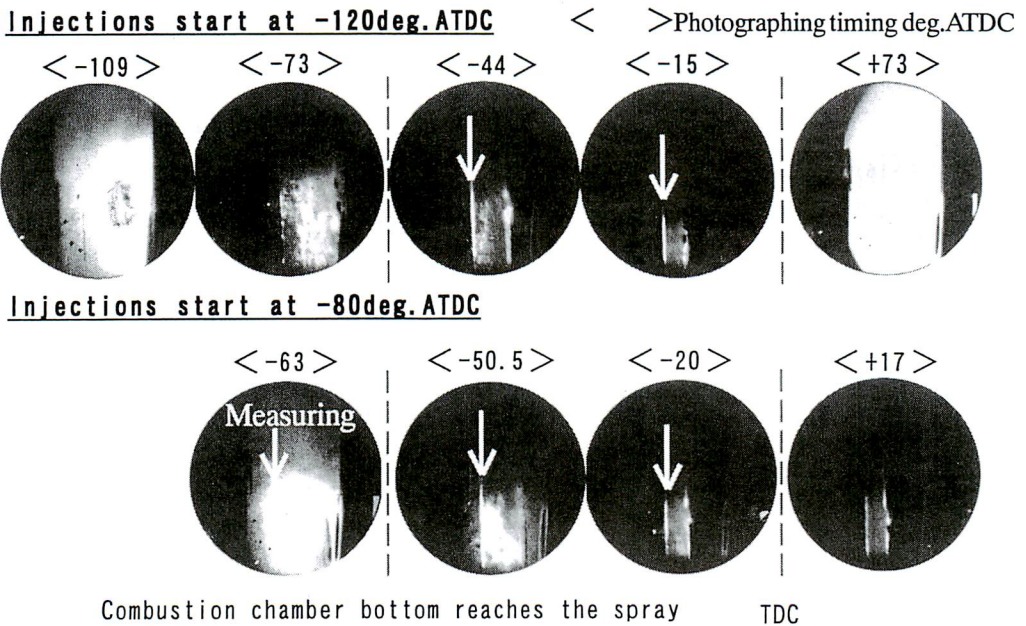


Fig.9 Fuel film proceeding on combustion chamber bottom

とを示す。その他の輝度の表われている部分については、レーザ光の迷光が測定位置以外の燃料油膜やピストン上方の噴霧を発光させていると考えられる。噴射時期 -120° ATDC の場合に比べ、噴射時期 -80° ATDC の場合の方が輝度の出ている部分の大きいのは、噴射時期が遅く撮影時点での噴霧の拡がり小さく噴霧の濃度が高いためと推定される。

撮影時期 -15° ATDC と撮影時期 -20° ATDC の画像でも、白矢印で示した測定位置に輝度の高い直線部分が現われ、燃料油膜が存在することになる。しかし、いずれの噴射時期の場合にも、この長さがひとつ前の撮影時期の場合に比べて短くなる。これは、圧縮行程が進むことによって筒内ガス温度が上昇し、蒸発により燃料油膜面積が小さくなったためと考えられる。また、測定位置以外の輝度の出ている部分の面積が、ひとつ前の撮影時期の場合に比べて小になる理由は、油膜面積が減少していることと、ピストン上方の噴霧の希薄化が進んでいるためと推定される。

上死点後の撮影時期 17° ATDC の画像では、測定位置に輝度は低いが直線部分が認められ、燃料油膜が存在することを示している。本来ならば、上死点付近での着火と燃焼によって燃料油膜は消滅するはずであるが、本実験では不活性ガスによる非燃焼場としているために油膜が残留したと考えられる。

撮影時期 73° ATDC の画像では、測定位置に輝度の高い直線部分は認められず、燃料油膜が消滅している。この場合も上死点通過直後には燃料油膜が残留していたものと推定されるが、圧縮高温場に長くさらされている間に油膜の蒸発が促進されたものと考えられる。逆に、測定位置以外の輝度の出ている部分の面積が大きくなっている。これは非燃焼場特有の現象で、圧縮による温度上昇で蒸発し拡がって

いた燃料が、膨張に伴う温度降下による再凝縮が生じ、噴霧形態の再発生が生じたためと推定される。

以上のように、噴射された燃料は噴霧として拡がった後に、 -60° ATDC あたりで燃焼室底面と接触して燃料油膜を形成し、圧縮にともなう温度上昇によって蒸発する。

3. 4 燃料油膜厚さと蛍光強度のキャリブレーション

撮影した蛍光画像の強度から、油膜の厚さを算出するためのキャリブレーションをおこなった。図10にキャリブレーションに用いた燃料保持用の石英ガラス製セルの形状を示す。中央の幅 5 mm の部分が燃料溝である。縦 20 mm 、横 20 mm 、厚さ 10 mm の石英ガラスに、溝深さ $20\text{ }\mu\text{ m}$ を狙いとして石英ガラス板2枚を光学接着した。燃料溝深さの完成寸法実測値は $21.75\text{ }\mu\text{ m}$ である。なお、図は重要な燃料溝を誇張して示した。

このセルを燃料溝のある面を下にして、燃焼室底面の測定位置でレーザシート光と燃料溝が垂直に交差するようにセットした。燃料溝には蛍光剤を添加した燃料を充填し、エンジンは停止した状態で油膜観察時と同様に撮影をおこなった。図11に蛍光の撮影結果を示す。白矢印が測定位置で、これに対して燃料溝が垂直に交差していることがわかる。この画像上で、測定位置のなかで燃料溝の部分の輝度値と画像上でその上下の石英ガラス板にあたる部分の輝度値を測定した。石英ガラス板にあたる部分にも蛍光が観察されるが、これは燃料がセルを持ち上げ

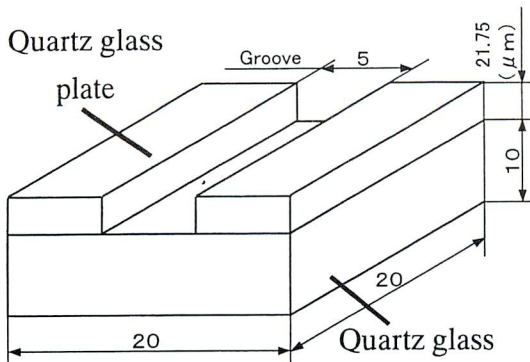


Fig.10 Quartz glass cell for calibration

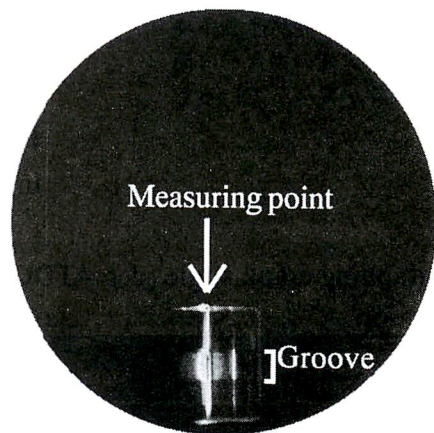


Fig.11 Photograph of fluorescence through quartz glass cell

て石英ガラス板と燃焼室底面の間に浸入しているためである。そこで、燃料溝の部分の輝度値から石英ガラス板にあたる部分の輝度値を差し引き、溝深さに相当する輝度値とした。この測定を3回繰り返した平均輝度値と、溝深さ実測値 $21.75 \mu\text{m}$ から、換算値 $4.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ / 単位輝度を得た。次項の燃料油膜厚さの換算にはこの値を用いた。

3. 5 燃料油膜厚さの算出

図12はキャリブレーションによって求めた輝度から油膜厚さへの換算値を用いて算出した油膜厚さの結果と、油膜形成と蒸発の推移について示す。油膜発生をクランク角との関係で見ると、本実験条件においては -60° ATDCあたりで燃焼室底面に噴霧に到達し、燃焼室底面に厚さ約40から $65 \mu\text{m}$ の油膜が発生する。その後、ピストン上昇に伴う圧縮による温度上昇とともに油膜は蒸発していく。

図13は原田ら⁽⁶⁾のボトムビュータイプの可視化エンジンによる噴霧観察画像である。噴射条件は噴射開始時期 -90° ATDC、噴射量 $49\text{mm}^3/\text{st}$ 、無過給である。噴射開始直後から噴霧の拡がりが見られるが、実際の油膜形成有無については判別不可能である。これに対し、本研究の測定手法を用いれば、油膜形成の時間的な推移を定量的に捉えることが可能である。ただし、図13の結果は燃焼が伴う条件下であり、本研究の場合とは筒内の温度条件が異なっているも

のと考えられる。本研究の手法を適用する場合には、これらの要因を加味した補正が必要と考えられる。

噴射時期を -120° ATDC から -80° ATDC に遅延させると、油膜厚さがやや減少する。千田ら⁽⁷⁾は、比較的低温の壁面に衝突した液滴は、 $We = \rho_f \cdot d_{in} \cdot V_{in}^2 / \sigma$ で示される入射Weber数が低い場合、壁面上で液膜を形成し易いことを示唆している。ここで、 ρ_f は燃料の密度、 d_{in} は衝突液滴の直径、 V_{in} は液滴の衝突速度、 σ は表面張力である。一方、高いWeber数で液滴が乾き壁面あるいは液膜に衝突すると、液滴自身の分裂あるいは液膜からの液滴の分裂飛散が生じ、Splash現象が発生することを述べている。本研究の場合にこれを考慮すると、噴射時期を -120° ATDC から -80° ATDC に遅延させたことで噴霧の拡がり小さくなるが、スワールによる影響で噴霧液滴が燃焼室底面に衝突する際の入射速度が

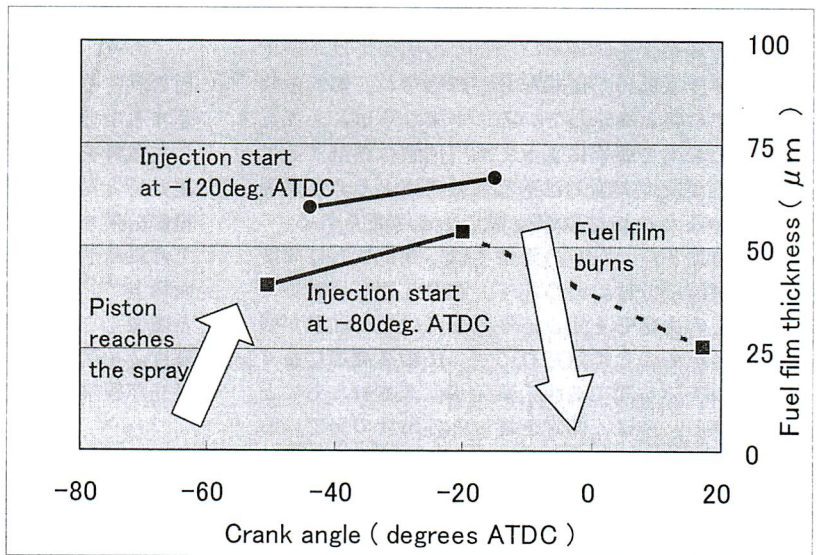


Fig.12 Calculating results of fuel film thickness
Injection start timing at -120 and -80deg.ATDC

Photographing crank angle (deg.ATDC)

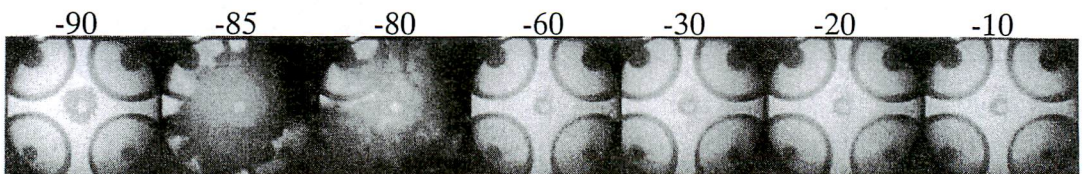


Fig. 13 Photograph of spray in engine with bottom view⁽⁶⁾

Injection start timing at -90° with injection quantity of $49\text{mm}^3/\text{st}$

速くなり、Splash 現象によって油膜形成が抑制されたと考えられる。

また、上死点後に油膜が存在することは、図12に示すように燃焼場においては油膜が火炎にさらされることを意味し、これが酸化不十分なまま排出され、THC やスモークの発生要因になっていると考えられる。

以上の結果をエンジンにおける排出ガスとの比較で考察するため、図14に大型エンジンで測定した排出ガスの結果を示す。エンジンの基本仕様は表1に示すものと同様で、燃料はJIS2号軽油である。噴射時期を -120° ATDC から -80° ATDC に遅延させると、THC の排出量が低減する。燃焼室底面に発生する油膜による THC 排出への寄与度を見極めることはできないが、両者の間に相関はあると考えられる。

3. 6 油膜厚さの算出値について

前項では蛍光強度から油膜厚さを算出した。しかし、この値は可視化エンジンでの測定値であり、実エンジンでの油膜厚さとの関連を考察するにあたっては以下に示す項目を考慮しておく必要がある。

- ①非燃焼場での測定のため、実機に比べて筒内温度が低く噴霧が気化しにくい。
- ②観察部に石英ガラスを使用しているため、測定部の表面温度が低く噴霧液滴が付着し易く、蒸発し難い。

これらにより観察部への付着量が本来より多くなる可能性があり、これらの要因を加味した補正が必要となると考えられる。

4. まとめ

エンジン運転状態での噴射燃料の燃焼室底面への付着について、LIF を応用した付着燃料油膜可視化手法を開発し、可視化エンジンの場合に適用し、次の結果が得られた。

- (1) 従来の可視化エンジンでは計測不能であった燃焼室底面の油膜形成の時間的推移を、定量的に捉えることを可能にした。
- (2) 本研究の実験条件において噴射された燃料は噴霧として拡がった後、 -60° ATDC あたりで燃焼室底面と接触し、厚さ約40から65 μm の油膜を形成する。
- (3) 上死点後にも油膜が観察される。これは燃焼場においては油膜が火炎にさらされることを意味し、酸化不十分なまま排出され THC やスモークの発生要因になると考えられる。

後に臨み、本研究の実験は田中孝史、佐復真人、山住英政、大沼正則研究員の協力により実施したことを付記する。

参考文献

- (1) 柳原弘道, 新しい混合気形成法によるディーゼルのNOx・煤同時低減, 日本機械学会第73期全国大会講演資料集VI F5-(1), (1995-9), PP. 45-47
- (2) 武田好央, 中込恵一, 新村恵一, 早期燃料噴射による希薄予混合ディーゼル燃焼の排出物特性,

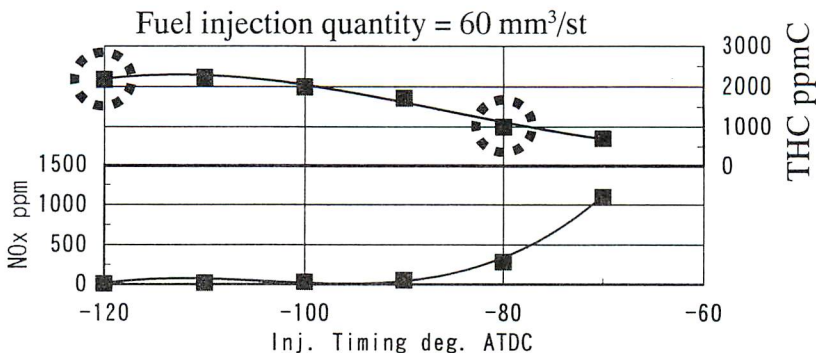


Fig. 14 Emission characteristics of engine with single cylinder on injection start timing

日本機械学会第73期全国大会講演論文集Ⅲ, 2209, (1995-9), PP.188-189.

- (3) Harada, A., Shimazaki, N., Sasaki, S., Miyamoto, T., Akagawa, H., Tsujimura, K., The Effect of Mixture Formation on Premixed Diesel Combustion, SAE paper 980533, (1998-3)
- (4) 赤川久, 宮本武司, 原田明, 佐々木覚, 島崎直基, 橋詰剛, 希薄予混合ディーゼル燃焼の問題点の解析と改善の試み, 自技会春季学術講演会前刷集 NO. 4-99, 9931990, (1999-5), PP. 1-4.
- (5) 西島義明, 浅海靖男, 青柳友三, ディーゼル噴霧のシリンダ壁面付着液膜の計測, 自技会秋季学術講演会前刷集 74-01, 20015543, (2001-10), PP. 19-22.
- (6) 原田明, 森田明芳, 浅海靖男, 青柳友三, 直接噴射式希薄予混合圧縮着火機関における過給時の燃焼排出物特性, 日本機械学会論文集(B), Vol. 67 No. 657, (2001-5), PP. 180-186.
- (7) 千田二郎, 神田知幸, 草野茂之, 藤本元, 液膜形成と液滴・液膜干渉を考慮した壁面衝突噴霧の分散と混合気形成過程のモデリング, 日本機械学会論文集(B), Vol. 65 No. 629, (1999-1), PP. 389-396.



西島義明

(株)新エイシーイー 主任研究員
現: (株)デンソー
〒448-8661 刈谷市昭和町1-1
Tel: 0566-25-8566
Fax: 0566-25-4652

略歴: 1986年名古屋大学大学院工学研究科博士課程(前期過程)修了。同年(株)デンソー入社。
1999-2001年(株)新エイシーイーに出向し, 高効率低エミッションディーゼル機関の燃焼研究に従事。
現在は(株)デンソーにて, 将来の内燃機関を支える噴射系の研究開発に従事。

E-mail: YOSHIAKI_NISHIJIMA@denso.co.jp



浅海靖男

(株)新エイシーイー 研究課長
現: 日産ディーゼル工業(株)
〒362-8523 上尾市大字1-1
Tel: 048-781-2325
Fax: 048-781-2387

略歴: 1979年東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日産ディーゼル工業(株)入社。
1999-2001年(株)新エイシーイーに出向し, ディーゼル機関の燃焼研究に従事。

現在は日産ディーゼル工業(株)にて, ディーゼル機関の燃焼, 計測, 後処理技術研究に従事。

E-mail: Yasuo_Asaumi@nissandiesel.co.jp



青柳友三

(株)新エイシーイー
常務取締役研究部長
〒305-0822 つくば市荻間2530
Tel: 0298-56-1801
Fax: 0298-55-1800

略歴: 1980年東京工業大学大学院博士課程機械工学専攻科修了。1971年日野自動車工業(株)入社。
1998年より(株)新エイシーイーに出向し, ディーゼル機関の排出ガス低減, 熱効率向上研究に従事。

E-mail: aoyagi@nace.jp