

ディーゼル機関のすす粒径に及ぼすノズル噴孔径の影響*

石田正弘^{*1}, 坂口大作^{*1}, 石橋研治^{*2}

Effect of Nozzle Orifice Size on Soot Particle Size in a DI Diesel Engine

Masahiro ISHIDA^{*3}, Daisaku SAKAGUCHI and Kenji ISHIBASHI^{*3}Dept. of Mechanical Systems Engineering, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-Machi, Nagasaki, Nagasaki, 852-8521 Japan

The effect of nozzle orifice size on smoke emission was examined experimentally in a turbocharged DI diesel engine. The nozzle orifice size was varied from 0.26 to 0.18 mm under various engine operation condition. The rates of NO-formation, soot-formation and soot-oxidation were analyzed by using the two-zone model based on the measured combustion pressure time history. The changes due to orifice size in the excess air ratio of the burned zone, the soot particle size and the number of soot particles were estimated. It is shown that the soot size is primarily dependent on the orifice size and secondarily but more markedly on the spray penetration for the ignition delay period, and the number of soot particles is primarily dependent on the amount of fuel injected and secondarily on the excess air ratio of the burned zone.

Key Words: Diesel Engine, Smoke, Nozzle Orifice Size, Soot Size, Soot Number Density

1. まえがき

ディーゼル機関は、自動車用高速小型機関および船用中・大型機関とも厳しい排ガス規制に対処する必要に迫られている。小型直噴機関では、燃焼室内での燃料の均質化、希薄化するなわち予混合化によるNOxおよび微粒子の同時低減が追究されるとともに、噴霧自身の改善によるNOxと微粒子の同時低減策として、微細噴孔⁽¹⁾、組合せノズル⁽²⁾、コモンレールによる多段噴射⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、噴射率制御⁽⁶⁾、パイロット噴射⁽⁷⁾⁽⁸⁾、水/燃料層状噴射⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾など、噴霧の微細化、最適化および複合化が検討されている。また、NOxおよびすすの生成に及ぼす噴霧の影響についても、モデル化や数値シミュレーションによる燃焼解析が多数行われている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

排煙を低減するには、噴霧粒径を小さくすることが基本的であり、噴射圧増大や噴孔径縮小によって得られることは周知のことである⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。Hiroyasu & Kadota⁽¹⁵⁾によって提案されたすす生成の半径経験モデルによれば、すすの生成率は主として拡散燃焼率と密接に関連し、また、すすの酸化率はすす粒径および燃焼域の酸

素濃度に依存している。このモデルの適用によりすすの生成・酸化解析が行われたところ、ほとんどの場合において定性的な一致が得られたが、この2段階モデルでは、すす粒径が既知であることが前提であり、詳細なすすの生成解析には限度がある。そこで、Kazakov & Foster⁽¹⁶⁾は、すすの生成から酸化に至る過程を9つに分けた多段階モデルを提案し、すす粒径の予測計算を初めて可能にした。しかしながら、いずれのモデルにおいても、すすの粒径および粒子数濃度と噴霧の物理的状態量との定量的関係については未だ明らかにされていない。

本研究では、ディーゼル機関から排出されるすすの粒径および粒子数に影響を及ぼす噴霧に関する物理的因子を定量的に明らかにすることを目的としており、噴射圧力がほぼ一定の通常噴射の条件下で、ノズル噴孔径、噴射時期および負荷を変化して得られた実験結果について、筆者ら⁽¹⁷⁾が提案した2領域モデルを用いてすすの解析を行った。すなわち、実測の燃焼時間履歴とNOx値を初期条件として燃焼域ガス温度時間履歴および燃焼域空気過剰率を算定し、推定された燃焼域ガス温度と実測の熱発生率および排煙濃度を初期条件としてすすの生成・酸化解析を行った。試行錯誤法によりすす粒径を推定するとともに、実測のすす濃度からすす粒子数を算定した。ここでは、既に信頼性が確認されている簡便なHiroyasuら⁽¹⁵⁾のモデルと同様の

* 原稿受付 2000年1月20日。

^{*1} 正員、長崎大学工学部(☎852-8521 長崎市文教町1-14)。^{*2} 日野自動車工業(株)(☎191-8660 日野市日野台3-1-1)。

E-mail: hiro@net.nagasaki-u.ac.jp

Morelら⁽¹⁸⁾のすすの生成・酸化のモデルを用いており、算定されたすす粒径およびすす粒子数と噴孔径、燃料噴射量、着火遅れ、噴霧到達距離、および燃焼域空気過剰率との関係を追究した。

2. 実験装置および実験方法

供試機関は、自動車用水冷4サイクル直接噴射式ターボ過給ディーゼル機関（ボア100mm、ストローク105mm、4気筒、圧縮比16、最大出力95.6kW(130PS)/3,500rpm：三菱自動車工業(株)製4D31-T型）を用い、水冷式インタークーラを別途装着することにより吸気温度を一定に保った。噴射ポンプは、燃料噴射時期を自由に設定できるハンドタイマーを装着した分配型ポンプを、また燃料噴射弁として図1に示すような最近広く使用されているツースプリングインゼクタを、またノズルチップとして噴孔数5、等ピッチの多噴孔ノズルを用いており、その噴孔径は0.26, 0.24, 0.22, 0.20, 0.18mmの5種である。

実験は機関回転速度を1,750 ± 5 rpm、機関入口での過給機入口吸気圧力を電動のプロワを用いて標準大気圧に、また機関入口吸気温度をインタークーラで調整することによって45 ± 1°Cに保ち、正味平均有効圧(P_m)が0.40および0.83MPaのそれぞれの負荷で、燃料噴射時期θ_{inj}を上死点前5°(5° BTDC)、上死点(TDC)、上死点后5°(5° ATDC)の3通り変化した。なお、供試燃油はセタン価約57のJIS2号軽油を使用した。筒内燃焼圧力、燃料噴射圧力および針弁リフトの時間履歴をそれぞれのセンサーで検出し、4チャンネル

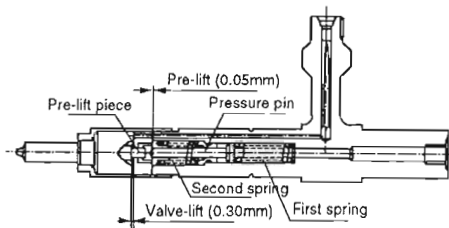


Fig.1 Section of tested two-spring injector

ル過渡燃焼解析装置CB-467（小野測器製）を用いてクランク角度1/4°毎のデータとして同時サンプリングした。得られたデータはパーソナルコンピュータへ転送されフロッピーディスクに集録された。燃焼解析では、連続した350サイクルに亘って計測されたアンサンプル平均のサイクル時間履歴を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 燃焼時間履歴に及ぼす噴孔径の影響 図2(a)および(b)は、噴孔径を0.26mmから0.02mm毎に0.18mmまで5種変化させたときの燃焼時間履歴を示す。(a)はP_m=0.40MPaの低負荷の場合、(b)はP_m=0.83MPaの高負荷の場合である。P_Nはノズル側燃料噴射管内圧力、Pは筒内燃焼圧力、dQ/dθは熱発生率、Liftはノズル針弁リフトを示す。供試ツースプリングインゼクタの特長は、リフト曲線から分かるように、一部の場を除けば、最大リフトの1/2以上の部分でリフトの上昇率が緩やかになり、初期の燃料噴射率が抑制さ

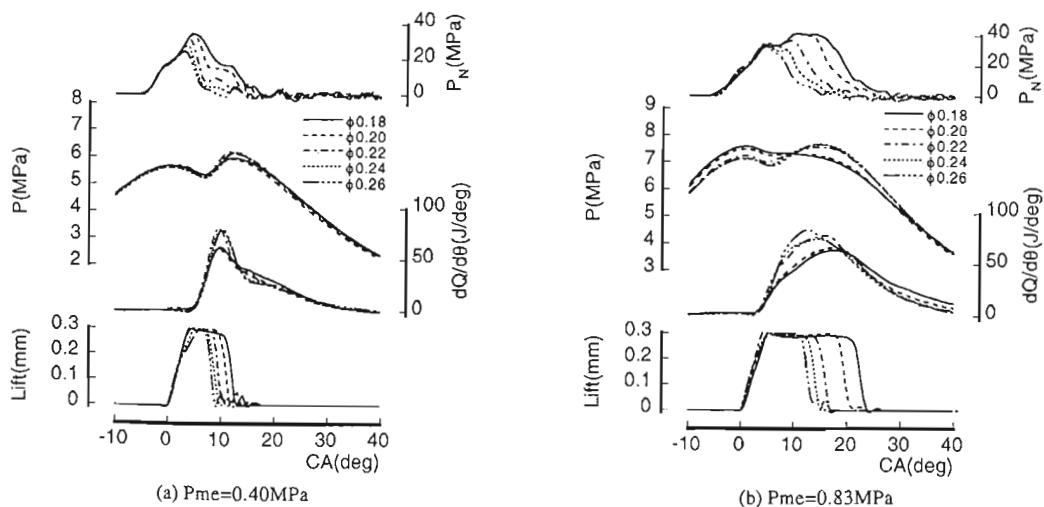


Fig.2 Change in combustion history due to nozzle orifice size (θ_{inj}=TDC)

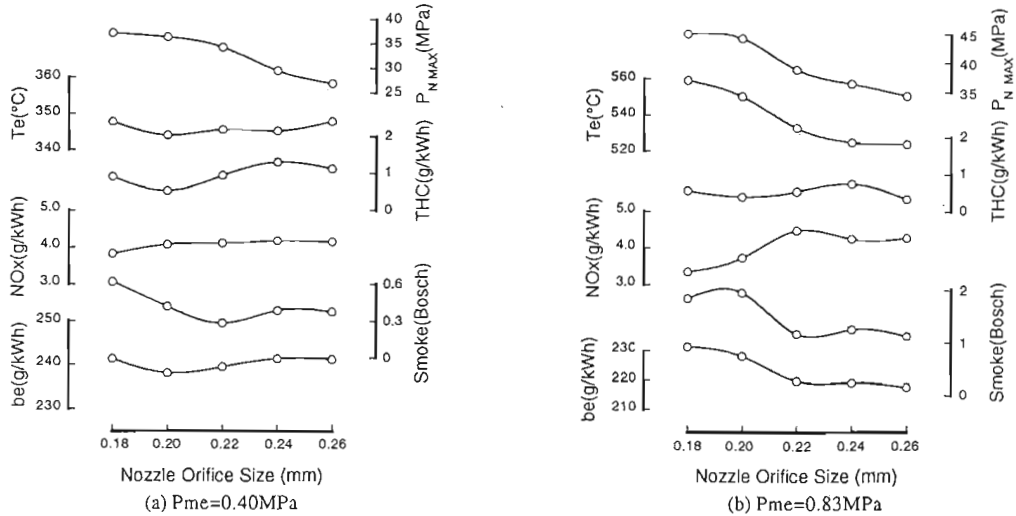


Fig.3 Change in engine performance due to nozzle orifice size (θ_{inj} =TDC)

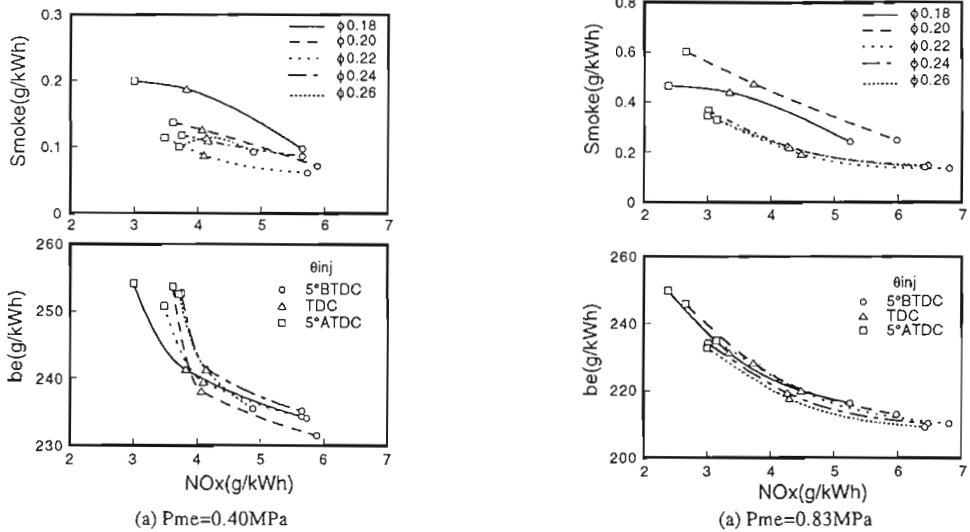


Fig.4 Change in trade-off due to nozzle orifice size

れるが、機関性能および初期燃焼を通常噴射弁の場合と比較した結果によれば、リフト曲線の相違に基づく差は顕著ではなかった。

噴孔径を小さくすることによって噴孔総面積が小さくなり最高燃料噴射圧が増加するが、いずれの負荷においても燃料噴射期間が順に増加し、特に噴孔径が0.20および0.18 mmの場合に著しく増加しており、このことが原因で高負荷では燃焼期間が著しく増大している。一方、低負荷では噴射期間が延びても燃焼期間は殆ど影響を受けていない、低・高負荷いずれにおいても、熱発生率の時間履歴が噴孔径0.22 mmの前後で

顕著に異なり、0.20および0.18 mmの場合、噴射率の大幅な変化により最高熱発生率が低くなったものと推定される。なお、圧縮行程中の筒内圧力が低負荷より高負荷で高く、また、燃焼期間が増大した場合にも高くなっており、これは供試機関がターボ過給機関であることに因る。

3.2 機関性能に及ぼす噴孔径の影響 図3(a)および(b)は、噴孔径による機関性能の変化を示す。下から順に、 be は燃料消費率、 $Smoke$ は排煙濃度、 NO_x は窒素酸化物排出率、 THC は未燃炭化水素排出率、 T_e は排気ガス温度、 P_{Nmax} は最高燃料噴射圧を示す。い

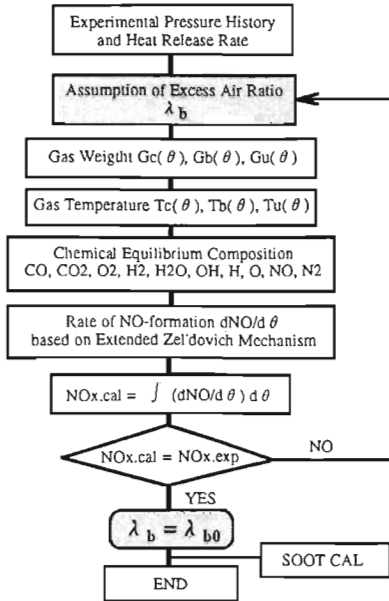


Fig.5 Flow-chart of NOx calculation

ずれの負荷においても噴孔径0.22 mm付近で排煙濃度が極小値を示し、また燃費がこの噴孔径近傍で極小値を示す。このことは、前節で述べたように、熱発生率曲線が噴孔径0.22 mm前後で顕著に変化することと密接に関連している。一方、NOxは噴孔径が小さいほど低い。噴孔径0.20 mm以下では噴孔総面積の減少に伴う最高燃料噴射圧の増加が顕著でなく、過度の噴孔絞りによって噴射期間が増大し、特に高負荷において、燃焼期間の増大、排気温度の上昇、延いては燃費および排煙濃度の増加の原因になっている。

3.3 トレードオフに及ぼす噴孔径の影響 図4(a)および(b)は、噴孔径が異なる場合の排煙とNOxおよび燃費とNOxの背反関係を示す。噴孔径が0.22 mmより大きい範囲では、噴孔径が小さいほど排煙とNOxの背反関係が僅かながら改善されるが、0.20 および0.18 mmの場合は、NOxは減少するものの排煙濃度が増加するためその背反関係は著しく悪化する。すなわち、排煙とNOxの背反関係は、いずれの負荷においても、噴孔径0.22mmの場合が最良である。一方、噴孔径による燃費とNOxの背反関係の変化はいずれの場合も小さい。

4. 2領域モデルによる解析

4.1 すすの生成・酸化モデル すすの正味生成率 (dS/dt)_n を推定するため、すすの生成率 (dS/dt)_f お

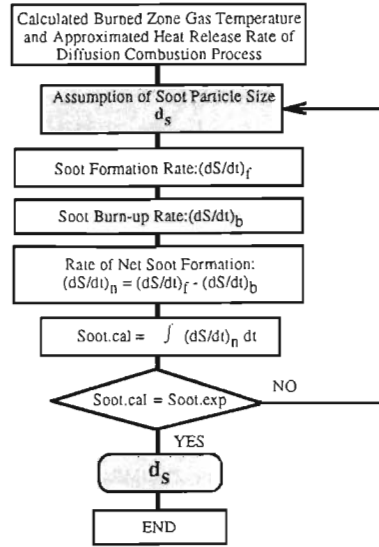


Fig.6 Flow-chart of soot calculation

よびすすの酸化率 (dS/dt)_b について、それぞれ以下に示す Morelら⁽¹⁸⁾が提案した式を採用した。なお、Kazakov & Foster⁽¹⁶⁾によって提案された現象論的すす生成モデルもあるが、2領域モデルに適用するにはここで採用したモデルが簡便で、また、Hiroyasuら⁽¹⁵⁾が提案したモデルとも極めて類似している。

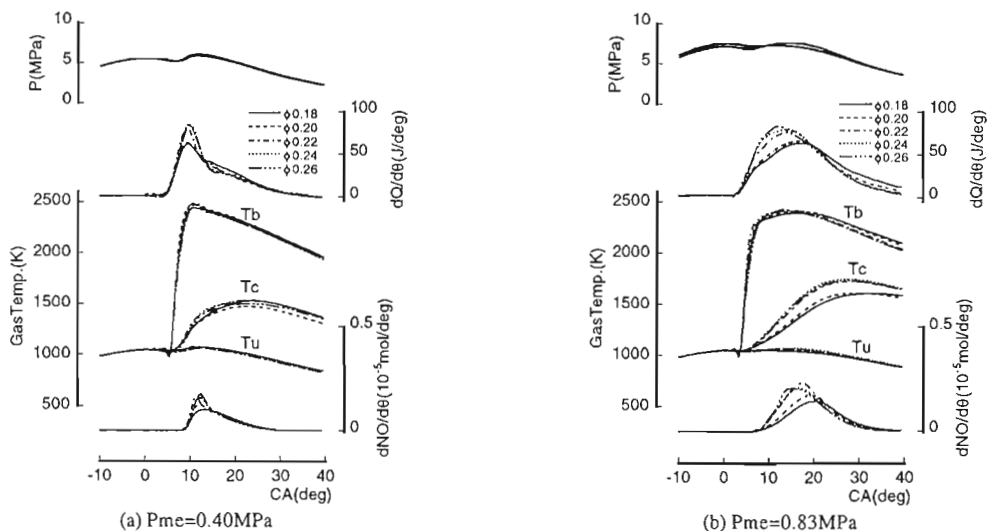
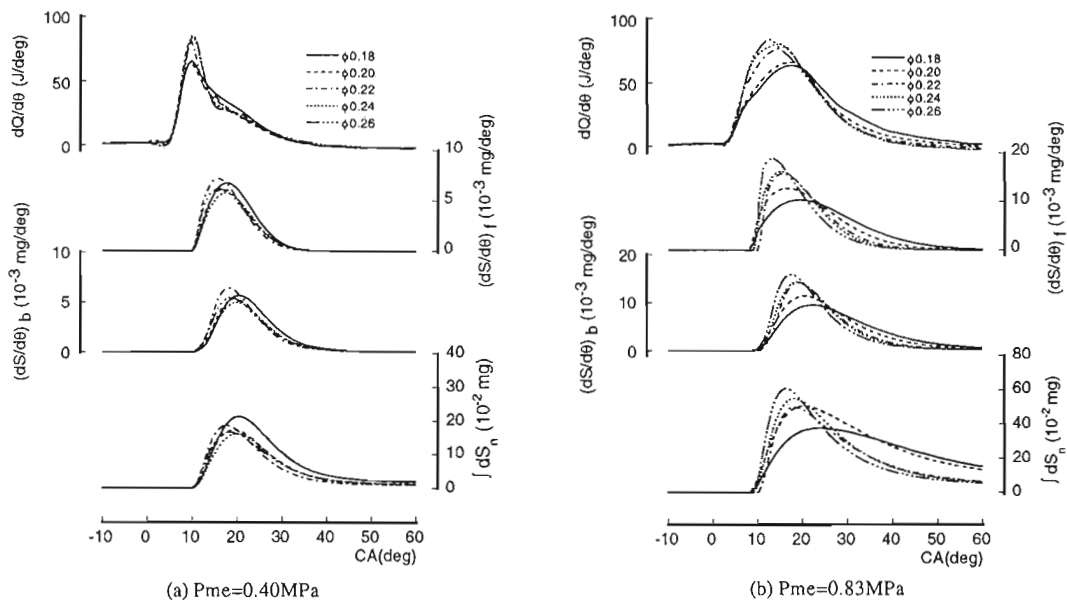
$$(dS/dt)_f = A_1 \cdot m_d \cdot \exp(-A_2/T_b) \tag{1}$$

$$(dS/dt)_b = (B_1 \cdot S) / (\rho_s \cdot d_s) \cdot \exp(-B_2/T_{rad}) \sqrt{P_{O_2}} \tag{2}$$

$$(dS/dt)_n = (dS/dt)_f - (dS/dt)_b \tag{3}$$

上式において、 m_d は拡散燃焼率で、ここでは実測の熱発生率時間履歴の拡散燃焼期間をWiebeの燃焼関数⁽¹⁹⁾で近似した。 T_b は燃焼域ガス温度、 ρ_s はすすの密度、 d_s はすす粒径、 T_{rad} は文献(18)で定義された燃焼域ガス輻射温度、 P_{O_2} は燃焼域の酸素分圧である。式中の定数として、 $A_1=0.1$ 、 $A_2=3,000$ 、 $B_1=0.054$ 、 $B_2=10,000$ を採用した。なお、供試機関の運転条件を変化した場合の相対的变化を評価するために、係数 B_1 は燃焼室形状に依存する実験定数と見なし、本実験では負荷 $Pme=0.83$ MPa、噴射時期 $\theta_{inj}=5^\circ BTDC$ において標準ノズルを用いた実験条件でのすす粒径を便宜上 $0.05 \mu m$ と仮定して、その場合の排出すす量の計算値と実測値が一致するように B_1 を決定した。

2領域モデル解析では、図5に示すフローチャートに従って、先ず計算NOx値が実測NOx値と一致する

Fig.7 Histories of gas temperatures and NO formation rate analyzed by the two-zone model (θ_{inj} =TDC)Fig.8 Histories of soot formation and oxidation analyzed by the two-zone model (θ_{inj} =TDC)

ように、試行錯誤法で燃焼域空気過剰率 λ_{00} および燃焼域ガス温度 T_b を確定し、次いで、図6に示すフローチャートに従って排出すす量の計算値が実測値と一致するように試行錯誤法で式(2)中のすす粒径 d_s を決定した。図7(a)および(b)は燃焼ガス温度およびNO生成率の時間履歴の解析例を示す。図中の T_b は燃焼域ガス温度、 T_c は筒内平均ガス温度、 T_u は未燃域ガス温度、また、 $dNO/d\theta$ はNO生成率を表す。いずれの負荷においても、噴孔径の縮小に基づく最高熱発生率の僅かな低

下によりNO生成率が減少していることが分かる。

また、図8(a)および(b)はすすの生成率 $(dS/d\theta)_g$ 、酸化率 $(dS/d\theta)_o$ および筒内正味すす量 $\int (dS/d\theta)_i d\theta$ の時間履歴解析結果を示す。なお、図の上部に示す熱発生率時間履歴において、予混合燃焼熱発生率のピーク位置を拡散燃焼の開始時期とし、また、熱発生率が負になる直前を拡散燃焼終了時期として最小2乗法によりWiebeの燃焼関数で近似した。正味すす量時間履歴の燃焼終了後の収束値が排出されるすす量(mg/cycle/

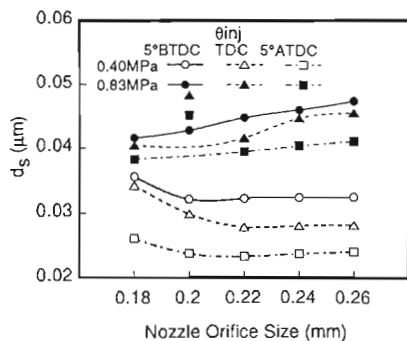


Fig.9 Change in soot size due to nozzle orifice size

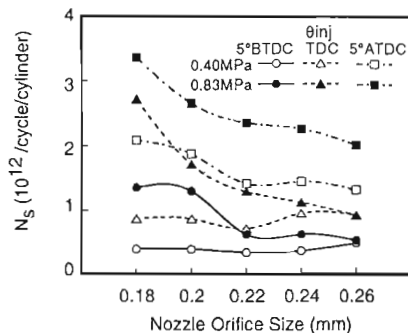


Fig.10 Estimated number of soot particles

cylinder)であり、その値は実測の排出すす量と一致させた。

実測の排出すす量と算定されたすす粒径を用いて、次の関係からすす粒子数 N_s を算定した。

$$S = \rho_s (\pi/6) d_s^3 \cdot N_s \quad (4)$$

図9は算定されたすす粒径 d_s を示し、また、図10は式(4)を用いて算定されたすす粒子数を示す。負荷および噴射時期一定の機関運転条件下でノズル噴孔径を縮小すると、すす粒径が減少する傾向を示している。棚沢ら⁶⁾が示した式によれば、噴霧の平均液径は噴孔径に比例しかつ噴出速度に反比例する。噴孔数を変えずに噴孔径を縮小すると噴孔総面積が減少し噴射圧力が増加する。本実験の場合、両者の作用によって噴霧平均粒径は45%程度小さくなるのが推定されるが、2領域モデルを用いた解析によって推算されたすす粒径の減少率は高々15%程度である。図9によれば、すす粒径の変化は、噴孔径よりも機関の負荷および噴射時期に基づく変化の方が大きい。また、噴孔径が0.20および0.18mmの場合において、すす粒径が増加している場合があるが、これは図2に示した熱発生率曲線

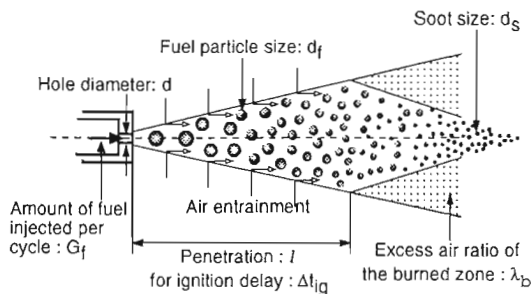


Fig.11 Conceptual spray flame model

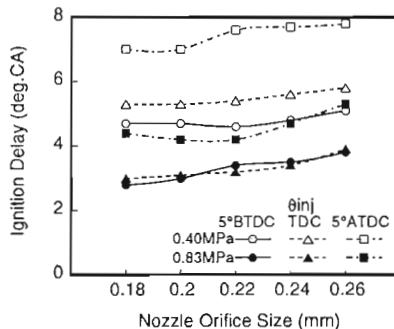


Fig.12 Change in ignition delay due to nozzle orifice size

が他の場合のそれと顕著な相違があることと関連しており、もし燃焼時間履歴が単調な変化であれば、すす粒径は噴孔径とともに減少したものと推定される。すなわち、すす粒径に及ぼす噴孔径縮小の一次的因子の影響よりは、それに基づく燃焼の変化、例えば着火遅れなどの二次的因子の影響が大きいことを示唆している。一方、すす粒子数の噴孔径縮小に基づく変化は、図3に示した排煙濃度の変化とおおよそ類似しており、また、燃費の変化との相関が推定され、噴孔径0.22mmの前後で増減傾向が変化している。

4・2 噴霧到達距離とすす粒径の関係 図11は単純化された噴霧火炎の概念的モデルを示す。モデルでは、噴霧先端部外周に無煙燃焼域が存在し、噴霧の中心部には先端に行くほど小さくなる燃料液滴、混合気およびすす粒子が存在することを概念的に示すため、未燃域と燃焼域を単純に区分した。なお、ここで示した噴霧火炎モデルは、Kazakov & Foster⁷⁾によって示されたものを参考にした。実際の小型機関の燃焼室内では、噴霧はスワールやスキッシュの影響を受けて円錐形を十分には維持できないであろうし、また、着火遅れが長い場合には噴霧がピストンキャピティの壁面に衝突するなどして、このような単純な形の噴霧火炎は

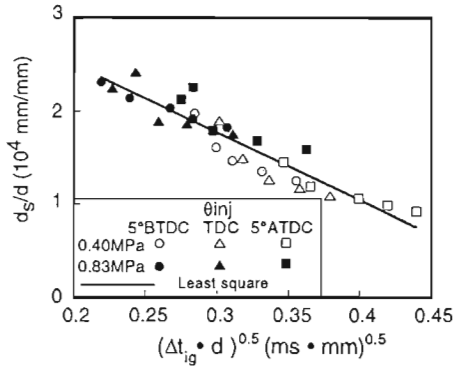


Fig.13 Effects of spray penetration for ignition delay period and orifice size on soot size

形成され難いことが想定される。

噴霧先端の液滴径は、噴霧到達距離が長いほど小さくとなると考え、図12に示すように、実測の着火遅れ(deg.CA)が噴孔径縮小によって短縮されることから判断すると、噴孔径縮小によって減少する筈の噴霧先端液滴径は着火遅れの短縮によってその減少が抑制されたものと推定される。

図13は、噴孔径で無次元化されたすす粒径 d_g/d に及ぼす噴霧到達距離の影響を示す。和栗ら⁽²¹⁾の運動量理論によれば、着火遅れ期間 Δt_{ig} (ms)の噴霧到達距離は $(\Delta t_{ig} \cdot d)^{0.5}$ に比例するので、図13の横軸としてこの値を採用している。ここでは、噴霧は燃焼室壁面に衝突せず、燃焼は噴霧内で行われ、かつ噴霧燃焼域ですが生成されると仮定しているために実際の現象と異なる部分が含まれるにも拘らず、噴孔径、噴射時期、および負荷の異なる種々のデータの殆どが、最少2乗近似直線の極く近くに存在する。噴孔径縮小によって、噴射圧力が僅かながら増加するが、このことは噴霧粒径をより小さくする効果、換言すれば、すす粒径をさらに小さくする因子である。すす粒径の減少率を抑制する因子としては、上述のように、着火遅れが短縮されること、すなわち、噴霧到達距離が短くなって噴霧液滴の蒸発時間が短縮されることが要因と推定される。このことを考慮した結果として、種々の仮定の下に算定されたすす粒径の値は、当然ながらそのばらつきが避けられないにも拘らず、図13が示す良好な相関関係は、すす粒径が噴孔径とほぼ比例関係にあって、かつ、噴霧到達距離の増加とともに直線的に減少することを示している。

4.3 すず粒子数と燃焼域空気過剰率の関係

すす粒子数に影響を及ぼす因子として、先ず燃料液滴数が考えられる。噴霧液滴径が一定の場合には、噴霧

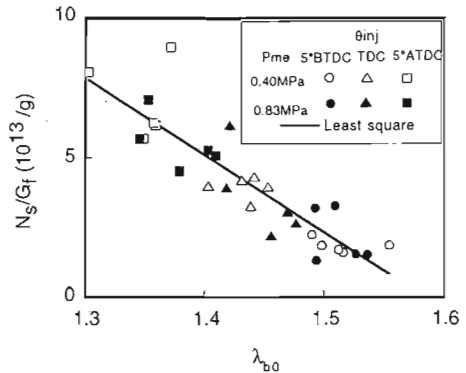


Fig.14 Effects of excess air ratio of the burned zone and the amount of fuel injected on number of soot particle

液滴数は燃料噴射量に比例して増加するから、すす粒子数が増加する確率が高くなるが、噴霧粒径が小さいほど蒸発が促進されるのですず粒子として残存する確率は低くなる。すなわち、噴霧液滴の蒸発時間換言すれば着火遅れが長いほど、加えて燃焼域の酸素濃度が高いほど、予混合燃焼期の無煙燃焼が促進されすす粒子数は減少すると想定される。換言すれば、すす粒子数を支配する一次的因子として噴霧液滴数が考えられ、二次的因子としては、すす粒径の場合と同様、着火遅れが考えられる。2領域モデル解析によれば、着火遅れの増加とともに燃焼域空気過剰率 λ_{b0} が増大するし、さらに、燃焼域空気過剰率の増加は、式(2)において燃焼域の酸素分圧を増加させることになり、すすの酸化を促進する。すなわち、着火遅れと酸素濃度の2つの因子を包含する物理的因子として燃焼域空気過剰率 λ_{b0} を採用した。図14は、すす粒子数 N_s と燃料噴射量 G_f (g/cycle/cylinder) および燃焼域空気過剰率 λ_{b0} との関係を示す。式(4)において排出す量として実測の既知量を用いているから、すす粒径が過小評価された場合にはすす粒子数が増加したものとして算定され、データの散らばりが避けられないにも拘らず、図14が示す良好な相関関係は、すす粒子数が負荷の増加あるいは燃費の増加換言すれば燃料噴射量にほぼ比例して増加し、かつ燃焼域空気過剰率の増加と共に直線的に減少することを示している。

ディーゼル燃焼においては、一般的に、着火直後の予混合燃焼は無煙燃焼であり、拡散燃焼量に比例して排煙が増加すると言われている。この場合の排煙の増加は、燃料噴射量の増加、換言すれば、燃料液滴数の増加がすす粒子数の増加となったものと考えられる。本実験の場合、供試機関がターボ過給機関であるため、噴孔径縮小によって噴射期間が増加し、特に高負

荷では燃焼期間が増加して排気温度が上昇する。このことによって過給機の回転速度が上昇し、自然吸入機関よりも大きな平均空気過剰率が得られている。その結果として、図14に示すように、低負荷および高負荷においてほぼ同程度の燃焼域空気過剰率になっており、負荷の異なる実験結果が、同じ図中で統一的に整理できたものと考えられる。

5. むすび

ターボ過給ディーゼル機関の排煙濃度に及ぼすノズル噴孔径縮小の影響を実験とモデル解析の両面から追求した。燃焼時間履歴の実測結果を2領域モデルを用いてすすの粒径および粒子数を算定し、ディーゼル燃焼におけるすす粒径およびすす粒子数と噴霧に関する物理量との関係を明らかにした。

(1)すす粒径は、噴孔径縮小に伴い減少し、準定常運動量理論により推算された着火遅れ期間中の噴霧到達距離の増加に従い減少する。なお、噴孔径縮小によるすす粒径の縮小効果は着火遅れ短縮により抑制される。

(2)すす粒子数は、燃料噴射量とほぼ比例的関係にあり、また、燃焼域空気過剰率の増加とともに顕著に減少する。なお、噴孔径縮小によって燃焼域空気過剰率が増加するため、すす粒子数は減少する。

(3)排煙濃度は、すす粒径とすす粒子数の積に依存しており、噴孔径縮小による排煙濃度の低下は、すす粒径の僅かな減少とすす粒子数の減少による。

(4)過度の噴孔径縮小は、すす粒径は小さくなるものの、燃焼期間の顕著な増加に基づく燃費悪化のため、

すす粒子数が増加して排煙濃度が増加する。

終に、供試噴射ノズルは(株)ゼクセルの提供によるものであり、また、実験に当り当時長崎大学大学院学生であった今地久夫(現在、ダイハツディーゼル(株))、岩永健一(現在、三菱重工業(株))、阪本秀男(現在、いすゞ自動車(株))諸氏の協力があったことを記して謝意を表する。

文 献

- (1) 秋山英之・ほか3名, 機論, 64-618, B(1998), 613-620
- (2) 庄司武志, 神本武征, 機論, 64-620, B(1998), 1268-1273
- (3) Endo, S., ほか4名, SAE Paper, 970818 (1997)
- (4) Verhoeven, D.D., ほか2名, SAE Paper, 981069 (1998)
- (5) Katoh, T., ほか4名, SAE Paper, 980806 (1998)
- (6) 畔津昭彦・ほか3名, 機論, 64-624, B(1998), 2737-2743
- (7) Ishida, M., ほか2名, Proc. 4th COMODIA, 51-56
- (8) 石田正弘・ほか3名, 機論, 64-619, B(1998), 961-968
- (9) 土佐陽三・ほか2名, 機論, 64-624, B(1998), 2744-2749
- (10) Takasaki, K., ほか3名, Proc. 4th COMODIA, 57-62
- (11) Patterson, M.A., Reitz, R.D., SAE Paper, 980131 (1998)
- (12) Mather, D.K., Reitz, R.D., SAE Paper, 980789 (1998)
- (13) Montgomery, D.T., ほか4名, SAE Paper, 962002 (1996)
- (14) Jacobsson, J., Chomiak, J., SAE Paper, 972964 (1997)
- (15) Hiroyasu, H. and Kadota, T., SAE Paper, 760129 (1976)
- (16) Kazakov, A., Foster, D.E., SAE Paper, 982463 (1998)
- (17) Ishida, M., ほか3名, JSME Intl. J., 39-1(B), 185-192 (1996)
- (18) Morel, T., Keribar, R., SAE Paper, 860445 (1986)
- (19) Miyamoto, N., ほか3名, SAE Paper, 850107 (1985)
- (20) 棚沢・豊田, 東北大学工学部報告, 19-2 (1955), 135
- (21) 和栗雄太郎・ほか3名, 機論, 25-156 (1959), 820-826