雰囲気と燃料噴射条件が舶用ディーゼル機関からの NOx、微小粒子排出特性に及ぼす影響

高木 正英*、大橋 厚人*、岸 武行*、川内 智詞* 井亀 優**、徐 芝徳**

Effects of Ambient and Fuel Injection Condition on NOx and Nano-particle Emission Characteristics in Marine Diesel Engine

by

Masahide TAKAGI, Atsuto OHASHI, Takeyuki KISHI, Satoshi KAWAUCHI, Masaru IKAME and Zhide XU

Abstract

The more stringent regulation related to exhaust emissions from marine diesel engines has been continually enforced by the International Maritime Organization (IMO). In addition to NOx emission standards, particulate matter (PM) or other substances may be restricted with regard to the environmental impact of these engines. In this study, we focus on high cylinder pressure and fuel injection control as a combustion technology for improvement of exhaust emissions. Furthermore, influence on emissions of NOx and nano-particles of these techniques was investigated.

NOx emission initially increases with the increase of cylinder pressure, then reaches a peak value, and finally decreases with the elevation of cylinder pressure in various oxygen concentration, fuel injection amount and fuel injection pressure.

In the nano-particles emitted from a diesel engine, the particle diameter with a bimodal distribution can be represented by the sum of two log-normal distribution (small and large diameter side), and the emission characteristics of small and large particles are examined with the control of fuel injection pressure and pilot injection amount and timing. By higher fuel injection pressure, the geometric mean diameter becomes smaller, and the total number of particles increases. The sum of the total projected-area of the large diameter side distribution is proportional to soot emissions. By the close pilot-main injection and large pilot injection amount, it is possible to reduce the number of particles in the small diameter side.

 ^{*} 環境・動力系、** 元海上技術安全研究所 原稿受付 平成 25 年 10 月 21 日
 審 査 日 平成 25 年 12 月 16 日

目 次

| 1. まえがき | |
|---------------|---------------------|
| 2. NOx 生成に及り | ぼす雰囲気圧力の効果 ・・・・ 38 |
| 2.1 実験装置及 | び方法 ・・・・・ 38 |
| 2.2 実験結果及 | び考察・・・・・ 39 |
| 2.2.1 壁面の | 影響 |
| 2.2.2 雰囲気 | 圧力の NOx 生成への影響 |
| (EGR | を行わない場合) ・・・・・・ 40 |
| 2.2.3 雰囲気 | 圧力の NOx 生成への影響 |
| (EGR | による低酸素雰囲気の場合)・43 |
| 3. 微小粒子排出) | こ及ぼす燃料噴射の効果 ・・・ 44 |
| 3.1 排気中の粒 | 径分布について ・・・・・・ 44 |
| 3.2 実験装置及 | ·び方法 ······ 45 |
| 3.3 実験結果及 | び考察・・・・・ 47 |
| 3.3.1 燃料噴 | 射圧力の影響 ・・・・・・・・・ 47 |
| 3.3.2 pilot 噴 | 射の影響 ・・・・・ 50 |
| 4. まとめ | |
| 謝辞 | 53 |
| 参考文献 | 53 |

号 記

| a | : 導入窒素モル数 [mol] |
|--------------------|------------------------------------|
| С | : 収縮係数 [-] |
| \overline{C} | : 粒子の熱運動速度 [cm/s] |
| C_{v} | : 雰囲気ガス定容比熱 [J/gK] |
| D | : ブラウン拡散係数 [cm²/s] |
| D_g | :幾何平均径 [nm] |
| D_p | :モビリティ粒径 [nm] |
| $dQ/dt _{max}$ | :最大熱発生率 [kJ/ms] |
| d_0 | : 噴孔径 [mm] |
| J | : 衝突確率 [1/cm ³ s] |
| k | : ボルツマン定数 [J/K] |
| K_{ij} | : ブラウン凝集係数 [cm³/s] |
| l | : 粒子の平均自由行程 [cm] |
| L_{th} | :理論空気量 [kg] |
| M | : 粒子質量 [kg] |
| M_{CO} | : CO 分子量 [g/mol] |
| M_{fuel} | : 燃料分子量 [g/mol] |
| m_g | :雰囲気ガス質量 [mg] |
| m _{inj} | :燃料噴射量 [mg] |
| M_{NO} | : NO 分子量 [g/mol] |
| m _{pilot} | : パイロット噴射量 [mm ³] |
| n | :各粒径での個数濃度 [1/cm ³] |
| N_i | :各モードでの総粒子数濃度 [1/cm ³] |
| N_t | :総粒子数濃度 [1/cm ³] |
| n_0 | : 噴射弁噴孔数 [-] |
| 5 | |

| P_b | : 圧縮前雰囲気圧力 [MPa] |
|-------------------|------------------------------|
| P_{inj} | :燃料噴射圧力 [MPa] |
| q_{mew} | : 排気流量 [kg/h] |
| q_{mf} | : 燃料流量 [kg/h] |
| Q_{total} | :総熱発生量 [kJ] |
| R_b | : Soot 捕集フィルタの反射率 [-] |
| R _c | : Soot 捕集前フィルタの反射率 [-] |
| Т | :温度 [K] |
| T_a | : 圧縮後雰囲気温度 [K] |
| T_b | : 圧縮前雰囲気温度 [℃] |
| t _{dur} | : 燃料噴射期間 [ms] |
| t _{end} | :燃焼終了時期 [ms] |
| t _{inj} | : 燃料噴射開始からの期間 [ms] |
| T _{int} | : pilot-main 噴射間隔 [deg.] |
| T _{main} | : 主噴射時期 [deg.ATDC] |
| t _{max} | :最大熱発生率発生時期 [ms] |
| W_{GAM} | : 燃料中硫黄質量分率 [ppm] |
| x | : 噴孔からの距離 [mm] |
| α | : 生成 NO モル数 [mol] |
| β | : 生成 CO モル数 [mol] |
| β_{0} | :燃料噴射角度 [°] |
| 20 | : 噴霧角 [rad] |
| λ_{air} | :空気分子の平均自由行程 [cm] |
| λ_{ave} | : シリンダ内平均空気過剰率 [-] |
| λ_{spray} | : 噴霧内平均空気過剰率 [-] |
| μ | :粘性係数 [g/cms] |
| ρ_a | : 雰囲気密度 [kg/m ³] |
| $ ho_{f}$ | : 燃料密度 [kg/m ³] |
| σ_{g} | :幾何標準偏差 [nm] |
| | |
| 下添字 | |

:小粒径側粒径分布 (1st モード) 1 2

: 大粒径側粒径分布 (2nd モード)

1. まえがき

IMO(国際海事機関)による舶用ディーゼル機関 からの有害排気物質低減に関する規制は強化さ れ続けており、それへの対応が求められている。 現在、窒素酸化物(NOx)については3次規制まで 段階的に改正・強化が行われる予定である。一方、 既にトラック等の自動車用ディーゼル機関にお いて規制されている粒子状物質(PM)やその他の 物質が IMO における規制対象として検討される ことが考えられる。

このような規制に対応するための技術として、 NOx 低減における SCR(Selective Catalytic reduction)装置のような後処理装置による方法の 他に、エンジン内の燃焼を制御することによって 有害排気物質を低減する方法がある。また CO2 排出に関連し、EEDI(Energy Efficiency Design Index)と呼ばれる指標を用いた規制が策定されて いる。そのため、舶用ディーゼル機関における燃 料消費率と有害排気物質の低減について、様々な 取り組みがなされるようになってきた。そこで本 研究では、燃料消費率、排気特性を改善するため の技術として注目されている高過給化と燃料噴 射制御(高圧化、多段化)について検討した。

ディーゼル機関における高過給化は熱効率を 向上、PM を低減させるため、NOx 低減のために 導入される排気再循環(EGR)によって悪化する燃 料消費率、PM 排出を改善することができる。高 過給化によってエンジン内の燃焼はより高圧場 で行われるが、これまで高圧雰囲気場での噴霧・ 燃焼については、Siebers ら¹⁾の噴霧に関する一連 の研究や、北村ら²⁾、八房ら³⁾の燃焼生成物に関 する研究、Kobori ら^{4), 5)}、Crua ら⁶⁾、藤本ら⁷⁾の 着火遅れに関する研究などが行われてきた。北村 らは定容容器において雰囲気圧力を4から8MPa に変更して、燃料あたりの NOx 質量が増加する ことを示している。この原因は圧力増加によって 噴霧内部への空気導入が増え、熱発生の増加とそ れに伴う燃焼の活性が影響していると考察して いる。八房らは、急速圧縮装置を用いてスワール 流と雰囲気圧力(圧縮後圧力 4、6、8MPa)を変更 した時の NOx 濃度を計測しているが、雰囲気圧 力の増加によって NOx が低下する結果が得られ、 同一雰囲気圧力での北村らとの結果とは逆の傾 向を示している。また、魯ら⁸⁾は過給圧力及び酸 素分圧を変更して急速圧縮膨張装置にて実験を 行い、酸素分圧による燃焼改善効果が大きいこと を示している。なお北村、魯らの結果では、総熱 発生量は雰囲気圧力の上昇によって向上してい る。これらの研究は雰囲気圧力が 10MPa 以下で あり、かつ実験装置の制約から壁面干渉の影響が 排除できない。そのため、舶用ディーゼル機関で のシリンダ内を想定するような高圧雰囲気での 噴霧燃焼による NOx 生成、燃焼状態への影響は 調べられていない。また系統的に排気の特性を調 べたデータや、EGR による酸素濃度低下によって、 雰囲気圧力の効果がどのように変化するかを調 べた例は見当たらない。そこで、雰囲気圧力の影 響を独立に変更することができる急速圧縮装置⁹⁾ を用いて、噴霧火炎の壁面干渉が燃焼、排気生成 に及ぼす影響を確認した後、雰囲気圧力を燃料噴 射圧力、雰囲気の酸素濃度に対して変更し、NOx 生成および熱発生率に及ぼす影響について検討 した。

一方、これまで、舶用ディーゼル機関から排出 される PM 等の粒子状物質に関して、多くの研究

が行われてきた。例えば、井亀ら¹⁰⁾は計測法の重 油燃焼排ガスへの対応について、安藤ら11)は排気 中の多環芳香族炭化水素(PAH)について検討して いる。また、ディーゼル機関から排出される微粒 子は健康への影響があることが指摘¹²⁾されてお り、更に PM2.5 への社会的な関心も増している。 そこで、本研究では粒子状物質中の微小粒子に焦 点を当てる。今後、舶用機関への NOx 規制が強 化されると、NOx-PM のトレードオフ関係がある ため粒子状物質の総質量は増加傾向になること が考えられる。しかし、PM 排出において質量割 合が相対的に小さい微小粒子の排出がどのよう になるかは不明である。微小粒子に関する研究は、 Kittelson らの研究があり¹²⁾、粒子の粒径分布や、 化学組成に関する詳細な検討がなされている。 Jung ら¹³⁾は、潤滑油が排出粒子に及ぼす影響を 調べ、また、過渡運転時の微小粒子の排出特性に ついても、Liuら¹⁴⁾や、久保ら¹⁵⁾によって検討さ れている。微小粒子に関する数値解析¹⁶⁾や揮発性 成分や化学物性についての詳細な検討¹⁷⁾も行わ れており、多くの知見が得られている。大型2ス トローク機関からの排出については、Kasper ら¹⁸⁾ によって検討されている。

ディーゼル機関における NOx、PM 低減のため の技術を使用した時の微小粒子の排出に関する 研究は、Mathis ら¹⁹⁾、Lähde ら²⁰⁾、Stumpf ら²¹⁾ が行っている。Mathis らは、噴射圧力と噴射時期 の遅延及びエマルジョン燃料の効果を、Lähde ら は噴射圧力、Stumpf らは、噴射圧力と EGR によ る微小粒子と Soot[FSN] (Filter Smoke number)と の関係を調べている。しかし、これらの実験で用 いられている機関のボアは約 125mm、回転速度 は 1000~2000rpm であり、舶用機関に比べてサイ ズが小さく、回転速度が速い。燃料中硫黄含有率 についても、低硫黄燃料(約 15ppm)を用いており、 現状の舶用燃料に比べて硫黄含有率が非常に小 さい。

舶用機関から排出される微小粒子に関して計 測されている例は参考文献 18)などの他にはほと んどなく、燃料噴射パターンの変更による微粒子 への影響を検討している例は見当たらない。

そこで、本研究では A 重油(硫黄含有率 470ppm) を使用したボア 190mm の舶用ディーゼル機関に おいて、コモンレール燃料噴射系を用いて燃料噴 射圧力と噴射時期の遅延を行った場合及び多段 噴射(pilot 噴射)時の燃料噴射圧力、pilot 噴射量、 pilot-main 噴射間隔をパラメータとした実験を行 った。本報告では、これらが微小粒子排出へどの ように影響するのか、そしてその要因は何かにつ いて解析した結果を示す。

2.1 実験装置及び方法

実験には、図-2.1 に示す急速圧縮装置を用いた。 設置しているピストン直径は100mm、ストローク は120mm である。ピストンに取り付けられてい る燃焼室の形状は圧縮比を上げるため、図-2.1 に 示すような形(噴霧軸方向長さ100mm、燃焼室厚 さ30mm、幅18mm 側の厚さ15mmの位置に燃料 噴射弁を設置)とした。この燃焼室形状は、燃料噴 霧が壁面の影響を受けることをなるべく避けるよ うにするため噴霧軸方向に100mmの長さを確保 している。

実験手順は以下の通りである。N₂/O₂ ガスボン べから圧力、温度調整器内ヘガスを導入し、圧力 と温度を設定値に調整する。その後、ピストンを 下死点まで下げた燃焼室内に吸気弁を開けてその ガスを充填した後、吸気弁を閉じ、ピストンを上 死点まで移動させる。120mmのストロークの移動 にかかる時間は約 30ms である。上死点にピスト ンを停止させて定容状態を作り出している 30ms の間に燃料噴霧、燃焼を行い、燃焼終了後、ピス トンを下死点へ移動させる。その間の圧力とピス トン変位の計測には KISTLER 社製圧電式センサ (6041A、チャージアンプ 5011B10Y26)と、ポテン ショメータ(novotechnik 社製、T150)を用いている。



ピストン移動後、排気弁を開け排気を排気管内に て水冷、サンプリングバックに収集し、除じん、 除湿のための前処理装置(日本サーモ製 MODEL 4N-300)を通して排気計測器(CO/CO₂計、日本サー モ製 4100-2、NOx/O₂計、日本サーモ製 5100-O)に より排気中の CO、CO₂、O₂、NOx 計測を行った。 CO/CO₂ は非分散型赤外吸収法(NDIR)、O₂ は磁気 式(PMD)、NOx は減圧式化学発光法(CLD)にて計 測している。

噴霧火炎の可視化は、シリンダヘッド部を同形 (直径 120mm、厚さ 70mm の円柱)の石英ガラスに 変更し、高速度ビデオカメラ(nac 製 GX-8、撮影 速度 25000fps、露光時間 4µs、絞り値 F11)を用い た直接撮影によって行われた。

実験条件として、雰囲気圧力と燃料噴射圧力、 雰囲気の酸素-窒素の割合を変更している。圧縮 前の雰囲気圧力 P_bは 0.3~0.9MPa の間で変更し、 その時の圧縮後雰囲気圧力 Paは 5.5~14.5 MPaとな っている。燃料噴射圧力 Piniは 50、100、130MPa の3条件である。酸素濃度は20.9(乾燥空気)、19.5、 17.6、14.3、8.4%の5条件であり、窒素バランス としている。壁温はヒータにより 140℃一定とし ている。それに合わせて圧縮前の燃焼室内に導入 されるガスも 140℃に加熱している。燃料噴射は コモンレール装置を用い、単噴孔燃料噴射弁の噴 孔径 d₀は 0.2mm である。 噴射量 m_{ini}は 55mg を基 準として条件によって変更している。なお噴射量 には、燃料噴射圧力、噴射期間 t_{dur} を変更し、大 気圧下で100回噴射した時の1回噴射あたりの平 均値を用いている。燃料には n-トリデカンを使用 した。

圧縮後の燃焼室内温度 T_aを確認するため、温度 の計測を行った。図-2.2 に非燃焼での燃焼室内圧 力、温度の一例を示す。圧縮前温度、圧力 T_b、P_b



図-2.2 実験時の時系列圧力, ピストン移動量の一例 及び雰囲気温度の確認

はそれぞれ 140℃、0.7MPa である。図には初期温 度と圧力から断熱圧縮を仮定して求めた燃焼室内 平均温度とピストン移動量を示している。燃焼室 内温度の計測には K 型熱電対((株)アンベ エスエ ムティ製 線径 25µm)を用いている。熱電対は図 -2.1 に示すように燃料噴射弁と同軸上の対向する 位置に設置してある。ピストンの移動によって燃 焼室内圧力は上昇する。燃焼室内平均温度に比べ て実測された温度はやや立ち上がりが遅れるが、 燃焼実験の際に燃料噴射を開始する時間には、平 均、実測値ともほぼ 900K で一致する結果となっ た。実測温度の立ち上がりが遅れるのは、計測位 置が壁面に近いことと、熱電対の応答遅れが原因 であると考えられる。なお、図に示した 0.7MPa の他に圧縮前圧力を 0.3~0.9MPa 間で変更した条 件においても燃料噴射を行わない非燃焼の状態で 計測を行い、燃料噴射時期での温度は全ての条件 で 890±10K になっていることを確認している。 燃焼室内平均空気過剰率 λave は、以下の式(2.1)に 示す燃焼反応式を用いて燃焼室内に導入された反 応物と計測された生成物の濃度から求めている。

$$\frac{1}{\lambda_{ave}} C_{13}H_{28} + 2O(O_2 + 3.773N_2) + aN_2$$

$$\rightarrow \left(\frac{13}{\lambda_{ave}} - \beta\right)CO_2 + \frac{14}{\lambda_{ave}}H_2O + \left(20 \times 3.773 + a - \frac{\alpha}{2}\right)N_2$$

$$+ \left\{2O\left(1 - \frac{1}{\lambda_{ave}}\right) - \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2}\right\}O_2 + \alpha NO + \beta CO$$

$$(2.1)$$

 aN_2 は酸素濃度変更時の窒素希釈を表している。 α 、 β は NO、CO のモル数である。計測された NOx は全て NO として計算している。なお、実験結果 として示す単位燃料噴射質量あたりの NOx、CO 質量[g/g_{fuel}]は式(2.1)の結果から得られる値を用 いて、以下の式で求めている。

 $NOx = M_{NO} \times \alpha \times \lambda_{ave} / M_{fuel}$ (2.2)

$$CO = M_{CO} \times \beta \times \lambda_{ave} / M_{fuel}$$
(2.3)

 M_{fuel} は燃料分子量(n-トリデカン;184.36g/mol)、 M_{NO} 、 M_{CO} は NO、CO 分子量(30.006g/mol、28.01 g/mol)である。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 壁面の影響

火炎が壁面に衝突する場合、参考文献 2)、8) などから熱発生率や排気に影響を及ぼすことが 考えられる。今回の研究では、なるべく壁面を考 慮せずに噴霧燃焼に与える雰囲気圧力の効果を 検討したい。そのため、雰囲気圧力は図-2.10、2-11 に後述するように燃料噴射弁と対向する壁面に 火炎が衝突する 5.5MPa とし、燃料噴射期間を変



図-2.3 燃料噴射期間変更時の熱発生率の変化



図-2.4 燃料噴射期間変更時の NO, CO 排出質量の変化

更することで火炎と壁面の衝突時間を変更して 燃焼、排気への影響を調べた。図-2.3、2.4 に熱発 生率と NOx、CO 生成質量を示す。燃料噴射圧力 は 130MPa、雰囲気は乾燥空気である。図-2.2 に 示すように圧縮後に上死点にピストンが停止中 に圧力が熱損失によって時々刻々と低下してい く。そのため熱発生率の算出には、非燃焼時にお ける放熱の影響を排除するため燃焼室内圧力低 下から熱損失を推定した。ディーゼル機関におけ る噴霧燃焼は、燃料噴射弁から噴射された燃料が 微粒化、蒸発することによって、雰囲気ガスとの 予混合気を形成し、噴射開始から着火までに生成 された予混合気が一斉に着火、燃焼する。図-2.3 においてこの燃焼初期の最大熱発生率となる部 分を予混合的な燃焼と呼ぶ。着火、予混合的な燃 焼に引き続いて生じる燃焼部分を拡散的な燃焼 と呼ぶ。この時の燃焼は、燃料噴射しながら火炎 帯が空間的に保持されている準定常的な現象と なっている。噴射期間を増加させても熱発生率は



図-2.5 雰囲気圧力に対する NO, CO 生成量の変化



図-2.6 雰囲気圧力による熱発生率への影響

同じ傾向を示し、燃焼初期の予混合的な燃焼の後 に拡散的な燃焼が生じていることが確認できる。 また、燃焼期間は拡散的な燃焼期間の延長によっ て長期化し、全ての条件で噴射終了から約 3ms 後に燃焼が終了している。噴射期間の長期化は、 壁面の影響を受けて総熱発生量の増加率を減少 させると予想していたが、今回の実験の範囲では そのような結果にはならず、総熱発生量は噴射期 間に対して直線的に増加した。燃料噴射質量あた りの NOx 生成質量は、噴射期間の長期化によっ て若干低下している。それに対して CO 質量は、 噴射期間の増加によってバラツキはあるが増加 していることがわかる。これは壁面に衝突した効 果であると考えられる。噴射期間を短くしてもあ る一定量 CO が生成されていることから、噴霧火 炎の壁面衝突による生成量より少ないが、噴霧内 の燃料蒸気濃度が高い領域でもCOは生成されて いると推測される。これより、熱発生率、NO、 CO の中では CO が最も噴霧火炎の壁面干渉の影



図-2.7 雰囲気の熱容量とNOx 生成量の関係

響を受けることが確認でき、今回行っている雰囲 気圧力条件では熱発生や NOx の検討において、 壁面の影響を考慮する必要がほとんどないこと がわかった。

2.2.2 雰囲気圧力の NOx 生成への影響 (EGR を行わない場合)

次に雰囲気圧力を変更して、NOx 生成量に及 ぼす影響を調べた。雰囲気は乾燥空気、噴射圧力 は130MPaとした。図-2.5 に雰囲気圧力に対する NOx、CO の変化を示す。確認のため、燃料噴射 量は 32、55mg(噴射期間 3.5、7.0ms)の 2 条件の結 果を示している。噴射量を変更しても NOx、CO 排出量は、雰囲気圧力に対して同様の傾向を示し ている。NOx 生成量は雰囲気圧力の上昇によって 増加した後、雰囲気圧力 9.0MPa 付近で最大とな り、更なる圧力の上昇によって低下することがわ かる。CO は雰囲気圧力が低いと生成量は多いが、 高くなるほど低下し、9.0MPa 以上ではほとんど 生成されていない。低雰囲気圧力で雰囲気圧力の 増加によって NOx が増加している領域では CO は減少している。これは CO が壁面干渉の影響だ けではなく、噴霧内の空気導入量の改善によって 減少し、その効果で NOx が増加していると考え られる。また CO がほとんど生成されない圧力領 域ならば、雰囲気圧力の増加によって NOx を低 減できることがわかる。

図-2.6 に雰囲気圧力 5.5、10.5、14.5MPa におけ る熱発生率を示す。雰囲気圧力の増加によって、 予混合的な燃焼のピークは低減していくことが わかる。熱発生期間、総熱発生量はほとんど変わ らなかった。この結果は、雰囲気圧力の増加が熱 発生量の増加を生じた他の結果^{2),8)}と異なってい るが、平均気過剰率が比較的大きいことによって、 燃焼室内平均温度が低くなること、高雰囲気圧力 によって噴霧燃焼による火炎の壁面衝突量が小



図-2.8 燃料噴射圧力による燃焼特性値への影響



図-2.9 燃料噴射圧力による NOx, CO 生成量への影響

さくなることから壁面の影響をほぼ無視でき、熱 損失を低減できていることが原因であると考え られる。

本研究では、雰囲気圧力の影響を検討している が、雰囲気圧力が増加すると同時に燃焼室内の熱 容量も増大してしまう。燃焼室内の熱容量は燃焼 によって生じる燃焼室内温度の上昇量を決める ため、NOxに及ぼす雰囲気圧力と熱容量の影響を 検討したい。そこで、単位燃料あたりの雰囲気ガ ス質量を変更して熱容量の影響を調べた。単位燃 料あたりの熱容量を変更する方法と、燃料噴 射量を固定して雰囲気ガス量を変更する方法と ある。雰囲気ガス量の変更は雰囲気圧力の増加に よって対応した。ここでは両者の方法を用いて比 較検討している。図-2.7に結果を示すが、熱容量 の影響がある場合、熱容量が大きくなれば NOx は減少すると考えられる。燃料噴射量を変更した



図-2.10 雰囲気圧力変更による燃焼火炎の変化



図-2.11 雰囲気圧力変更による火炎位置と火炎体積の変化

時にほとんど NOx 生成量が変わらないことから, 本実験において熱容量の影響はほとんどないと 言える。一方、2つの方法によって得られた熱容 量と NOx 生成量の関係は異なる傾向を示してい る。熱容量が約 50J/gK の時に特に両者に差が現 れる。この差は雰囲気圧力によって微粒化や噴霧 体積等の噴霧特性とその後の燃焼が変わったこ とが原因である。

燃料噴射圧力による微粒化性能および混合促 進の違いが燃焼、排気性能にどのような影響があ



図-2.12 噴射圧力,雰囲気圧力による火炎への影響 (*t_{in}=*4.0 ms)

るのかを調べるため、噴射圧力を 50、100、130MPa と変更した時の総熱発生量 Ototal、燃焼終了時期 t_{end} 、最大熱発生率 $dQ/dt|_{max}$ とその時期 t_{max} を図 -2.8 に示す。燃料噴射量を 32mg 一定にしたため、 各噴射圧力での噴射期間を 5.8ms(50MPa)、 4.0ms(100MPa)、3.5ms(130MPa)に変更している。 総熱発生量は噴射圧力が高い方が大きい。また雰 囲気圧力の増加に対して、総熱発生量はどの噴射 圧力でも低雰囲気圧力の領域では増加しその後 わずかに減少する傾向を示す。燃焼終了時期に及 ぼす雰囲気圧力の影響はほとんどなく、最大熱発 生率は雰囲気圧力が 5.5MPa の時のみ予混合的な 燃焼側に、その他は拡散的な燃焼側にピークがあ る。一方、高噴射圧力化は最大熱発生率を増加さ せる。以上のように熱発生率から得られた結果か らは、各噴射圧力での雰囲気圧力変更時の効果は ほとんど現れないことがわかった。図-2.9に燃料 噴射圧力の NOx、CO 生成量への影響を示す。雰 囲気圧力が低い場合には低噴射圧力で NOx 生成 量が小さくなるが、雰囲気圧力の増加に対して最 大値をとる傾向は変わらない。また CO 生成量も 噴射圧力の影響がほとんどない。これより、噴射 圧力変更による排気特性への影響は雰囲気圧力 の効果に比べて小さいことがわかった。

雰囲気圧力が変更された時、火炎形状がどのように変化していくかを調べるために直接撮影による可視化を行った。装置の関係から雰囲気圧力は12MPa以下の5条件、噴射圧力は130MPa、燃料噴射量は55mgとした。図-2.10に各雰囲気圧力での時系列結果を、図-2.11に火炎体積と火炎位置を示す。図-2.10の画像上側(左側にある軸0mmの位置)に噴射弁が設置してあり、下側に向かっ



図-2.13 酸素濃度のNOx 生成量への効果



図-2.14 酸素濃度の CO 生成量への効果

て燃料噴射されている。火炎画像の数値化は二値 化処理を施した後、火炎位置を燃料噴射方向であ る画像上下方向の最も噴孔側と先端の位置と定 義し、体積は噴霧火炎が軸対称であることを仮定 して求めている。火炎画像内の点線は燃焼室壁面 を表している。雰囲気圧力の増加によって、火炎 の到達距離は短くなり、雰囲気圧力が 7.3MPa 以 上では火炎が対向壁面に衝突することはない。な お、側壁面には火炎は連続的に接触していない。 また、図-2.11 において 0~40mm 付近に示されて いる火炎位置から噴孔までの距離は雰囲気圧力 の増加によって短くなること²²⁾も確認できる。雰 囲気圧力が増加するほど、火炎の発生する時期は 早くなり、火炎の存在位置は噴孔側に移動し火炎 体積は小さくなる。噴霧が着火してから火炎が噴 霧上流、下流へ進展していく速度は、火炎体積の 増加率がほとんど変わらないことから雰囲気圧 力によらずほぼ一定であることがわかる。次に図 -2.12 に燃料噴射後 4.0ms での噴射圧力、雰囲気 圧力を変更した時の可視化画像を示す。噴射圧力



図-2.15 酸素濃度変更時の NOx-CO の関係



図-2.16 酸素濃度変更時の熱発生率

は 50、100、130MPa、雰囲気圧力は 5.5、9.1、 11.8MPa である。噴射圧力が高く、雰囲気圧力が 低いほど、火炎の到達距離が長くなる。また、噴 射圧力が変更されても、雰囲気圧力の増加によっ て噴孔から火炎までの距離が短くなる傾向は変 わらないことがわかる。

2.2.3 雰囲気圧力の NOx 生成への影響 (EGR による低酸素雰囲気の場合)

ここでは雰囲気圧力の影響が酸素濃度によっ てどのように変化するのかを明らかにする。図 -2.13、2.14 は酸素濃度を変更した時の雰囲気圧力 が NOx、CO 生成量に及ぼす影響を調べた結果を 示している。燃料噴射量は 55mg、噴射圧力は 130MPa、横軸はシリンダ内平均空気過剰率であ る。空気過剰率は雰囲気の余剰酸素質量の割合を 示している。燃料噴射量は一定であるため、空気 過剰率の変化は雰囲気圧力の変更によってもた らされている。つまり、高雰囲気圧力条件では高 空気過剰率になる。同一空気過剰率でも酸素濃度



図-2.17 酸素濃度変更時の燃焼特性値

によって NOx 生成量が異なることから、NOx 生 成量は雰囲気の酸素質量ではなく、酸素濃度を低 くすることによって低下することが確認できる。 各酸素濃度で NOx 生成量が最大値となる空気過 剰率は酸素濃度が低いほど小さくなっている。酸 素濃度 8.4%の条件では NOx 濃度は最大 3ppm で あり、圧力影響を本実験では確認できなかった。 また、このとき CO がほとんど生成されない領域 まで雰囲気圧力を増加できていないことがわか る。他の酸素濃度の結果と比べて、変更している 雰囲気圧力の範囲が同じにもかかわらず空気過 剰率の範囲が狭いのは、未燃成分が多く、今回空 気過剰率を求めるために用いた式(2.1)の仮定が 成り立たっていないことが考えられる。NOx 生成 量はその他の酸素濃度では同じ傾向を示し、CO 生成量が増加し始める空気過剰率で NOx 生成量 は最大になっている。CO 生成量は酸素濃度によ って増加し始める空気過剰率が若干異なるが、酸 素濃度ではなく空気過剰率に関係していること がわかった。排気と噴霧内空気過剰率の関係を和 栗ら²³⁾の運動量理論を用いて検討する。噴霧内空 気過剰率は以下の式で表される。

$$\lambda_{spray} = \frac{2\tan\theta}{L_{th}\sqrt{c}} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \frac{x}{d_o}$$
(2.4)

20は噴霧角、 ρ_a 、 ρ_f は雰囲気及び燃料密度、 L_{th} は理論空気量、cは収縮係数、xは噴孔からの距離である。この式から雰囲気圧力が高くなる時に、 雰囲気密度が増加し空気過剰率も大きくなる。 CO は噴霧内の燃料過剰、酸素不足によって生成していると考えられ、NOx は噴霧内の局所空気過 剰率が1付近で最大になる。図-2.15に図-2.13、 2.14における NOx と CO の関係を整理し直した 結果を示す。これより、雰囲気圧力の増加によっ て噴霧内への酸素導入量は増え、燃料過剰領域が



図-2.18 酸素濃度変更による火炎画像 (P=10.5MPa)



図-2.19 酸素濃度変更による火炎位置,火炎体積の変化

減少、量論付近の領域が増加し、CO 減少、NOx 増加となる。更に雰囲気圧力の増加に併せて酸素 導入量は更に増え、噴霧内に量論から希薄側の領 域が増えることによって、CO ほぼ生成なし、NOx 減少となることが推測できる。従って、噴霧燃焼 において、雰囲気圧力を増加させていくと、噴霧 内の空気過剰率を大きくでき、希薄化を実現でき ていると考えられる。

図-2.16 に雰囲気圧力 10.5MPa における酸素濃 度を変更した時の熱発生率を、図-2.17 に雰囲気 圧力、酸素濃度を変更した時の総熱発生量、燃焼 終了時期、最大熱発生率とその時期を示す。雰囲 気圧力を 10.5MPa まで上昇させた結果、熱発生率 からは予混合的な燃焼はほとんど見られなくな った。酸素濃度を変更しても熱発生のパターンは ほとんど変わらず、酸素濃度の低下によって燃焼 期間が延びていること、酸素濃度 8.4%の時に噴 射期間中の熱発生率が他の条件と比べて小さい ことがわかる。総熱発生量は、酸素濃度が高い場 合、雰囲気圧力によってほとんど変わらないが、 濃度が低い場合、低雰囲気圧力条件下で小さくな る傾向がある。これは、後述する火炎領域の拡大 による壁面熱損失の増加と酸素不足による燃焼 性の悪化が原因であると考えられる。最大熱発生 率とその時期は、高圧雰囲気下での拡散的な燃焼 が主体になった時には酸素濃度を変更してもほ ぼ変わらない結果となった。

図-2.18、2.19 に雰囲気圧力 10.5MPa における 酸素濃度 17.6、14.3%での可視化画像と画像から 算出した火炎位置と体積の時間変化を示す。図 -2.16 の熱発生率では着火遅れの差を確認できな かったが、火炎発生時期は酸素濃度の低下に従っ て遅れていることがわかる。火炎到達距離と噴孔 から火炎位置までの距離は、酸素濃度が低いほど 長い。火炎体積は酸素濃度が低いと大きくなり、 噴霧火炎の進行方向だけではなく、幅方向にも広 がっている。酸素濃度 14.3%の時には噴射開始後 6.0~8.0ms の間で燃焼室のほとんどが火炎で占め られている。また図-2.16、2-17 の圧力解析の結果 と同様、火炎の存在時間が酸素濃度の低下によっ て延びていることがわかる。

3. 微小粒子排出に及ぼす燃料噴射の効果

3.1 排気中の粒径分布について

ディーゼル機関から排出される微小粒子の粒 径分布は概念的には図-3.1 に示されるようにな ると言われている¹²⁾。図内には、数濃度、体積濃 度、質量濃度を表し、また大気エアロゾルに用い られている PM10 等の区分も併せて示している。 最も小さい 10nm 付近にピークを持つ粒径は核生 成 (nuclei)モード、100nm 付近の粒径は凝集 (accumulation)モード、1000nm 以上の粒径は粗大 (coarse)モードと呼ばれている。核生成モードの



図-3.1 ディーゼル機関からの微小粒子

粒子は、排気の希釈と冷却の影響によって生成さ れる粒子で、半揮発性の有機化合物と硫黄化合物 から生成される。Accumulation モードは炭素質の 塊と核生成モードによって生成された粒子が吸 着したものであり、coarse モードはディーゼル機 関の噴霧燃焼からは生成されず、クランクケース 内にある粒子のシリンダ内への再導入によって 計測される。これら微小粒子の生成・成長過程は、 以下のような順で生じると考えられている。

- (1) 未燃炭化水素または潤滑油からの揮発性炭 化水素及び硫黄化合物の冷却及び希釈に よる核生成
- (2) 相変化である凝縮及び表面反応による粒子 の成長
- (3) 凝集による粒子の成長

3.2 実験装置及び方法

実験には、舶用4ストローク機関を用いた。本 機関は、6気筒4ストローク過給器インタークー ラ付ディーゼルエンジンである。機関諸元は表 -3.1に、燃焼室の形状と燃料噴霧の幾何学的な関 係は図-3.2に示す。

排気計測には、堀場製作所製 MEXA-1600 DEGR を用い、NOx、CO、CO₂、O₂、THC の 5 成分の計測を行った。各成分の計測方法は、CO、 CO₂は非分散型赤外吸収法(NDIR)、O₂は磁気式 (MPD)、THC は水素炎イオン化法(FID)、NOx は 化学発光法(CLD)である。Sootの計測にはスモー クメータ(AVL 社製 AVL415S)を、微小粒子の計測 には、SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)を使 用している。SMPS を構成している DMA (Differential Mobility Analyzer) と CPC (Condensation Particle Counter)には、TSI 社製 Model 3936-SMPSL76 を、希釈器には、ロータリ 一希 釈 器 (Matter Aerosol Engineering AG MD19-2E)を用いた。 圧力計測には KISTLER 社製 圧電センサ 6041A(チャージアンプ 5018A1010)を 使用している。実験に使用した燃料は、低硫黄 A 重油(硫黄含有率 470ppm)である。微小粒子は、ま ず排気を希釈器によって空気と混合、希釈するこ とで計測器内での粒子同士の凝集が生じないよ うにしている。その後、DMA によって粒子を帯 電させて電気移動度の差によって分級し、CPC 内 で気化されたブタノールが粒子を核にして凝縮 し、検出器にて計測できる大きさになることで粒 子数をカウントしている。

実験条件は、燃料噴射圧力と噴射時期を変更する Casel と、pilot 噴射の噴射量、噴射時期、噴射 圧力を変更する Case2 の 2 条件とする。なお、そ れぞれの値は表-3.2 に示す範囲で変更している。

表-3.1 機関諸元

| Cyl. No Bore×Stroke [mm] | L6- \u00f6190 \times 260 |
|---|----------------------------------|
| Displacement [cm ³] | 44232 |
| Compression Ratio | 13.8 |
| Max output [kW/rpm] | 750/1000 |
| Combustion System | Direct Injection |
| Combustion Chamber | Shallow Dish |
| Fuel Injection System | Common Rail System |
| Nozzle Hole $[mm] \times n_0 -$ Spay angle β_0 [°] | $\phi 0.29\!\times\!9-140^\circ$ |



図-3.2 供試機関の燃焼室形状

表-3.2 実験条件

| Casel | | |
|---|------------------------------|--|
| Injection Pressure P _{inj} [MPa] | 68、80、100、 120、140 | |
| Main injection Timing T _{main} [deg.ATDC] | -8.4、-6.0、-3.5、 -1.0、+1.5 | |
| Case2 | | |
| Injection Pressure P _{inj} [MPa] | 100、120、140 | |
| Main injection Timing T_{main} [deg.ATDC] | -8.4 | |
| Pilot injection amount m _{pilot} [mm ³] | 10、50 | |
| Pilot-main injection dwell T_{int} [deg.] | 4.9、9.8、22.7 | |
| Engine output [kW/rpm] | 185/630 | |

ここで pilot 噴射とは、main 噴射より前に main 噴射とは分割してシリンダ内に燃料を噴射する ことを言う。機関負荷は 185kW、630rpm 一定で 行っている。

一般には、ディーゼル機関から排出される粒子の粒径分布は、対数正規分布で表されることが知られている。従って、平均径、標準偏差には対数 正規分布に合わせた以下に示す幾何平均径 *D_g*と 幾何標準偏差*σ_gを*用いる。

$$D_g = \left(\prod_i D_{\rho_i}^{\eta_i}\right)^{1/N_t} \tag{3.1}$$

$$\log \sigma_g = \left[\frac{\sum n_i (\log D_{\rho i} - \log D_g)^2}{N_t - 1}\right]^{1/2}$$
(3.2)

 D_p は粒径(モビリティ径)、nは各粒径の個数濃度、 N_i は計測された総粒子数濃度である。SMPSによって計測されるモビリティ径は、単位電界強度あたりの平衡速度である電気移動度から求められる粒径である。

実験結果に対数正規分布を適用する場合、図 -3.3 に示すような実験結果では、粒径分布は2つ



図-3.3 対数正規分布を用いた実験結果の変換





のピーク(bimodal)を持つため、式(3.1)と(3.2)から 計算される幾何平均径と幾何標準偏差を用いた 通常の対数正規分布では実験結果を表すことが できなかった。従って、bimodal な粒径分布に即 して、式(3.3)に示す 2 つの対数正規分布の和²⁴⁾ を用いた。この方法は、大気エアロゾルの粒径分 布を表す場合にしばしば用いられている。なお、 2 つの対数正規分布の小粒径側を 1st モード、大 粒径側を 2nd モードと呼ぶ。今回の実験の整理に は全て式(3.3)を適用している。





図-3.5 燃料噴射圧力と燃費,排気特性の関係



図-3.6 燃料噴射圧力と熱発生率

 N_i は各モードでの総粒子数濃度である。式(3.3) によって実験結果を表すためには、6つの定数 N_I 、 N_2 、 D_{g1} 、 D_{g2} 、 σ_{g1} 、 σ_{g2} を決定する必要がある。 各定数は以下のように求めている。図-3.4 にある 2つの対数正規分布によって実験結果を表した結 果に見られるように、2つの分布関数はある領域 で重なっている。そのため 1st モードの粒数 N_I は、実験結果から得られる粒径が0から $\sigma_{g1}^{1/2}D_{g1}$ までの粒子数の総和とした。対数正規分布は、変 数変換によって標準正規分布になる。対数正規分 布において $\sigma_{g1}^{1/2}D_{g1}$ の粒径は、標準正規分布では 0.5 に相当する。2nd モードの粒数 N_2 は、実験結 果から得られる総粒子数 N_i から N_I を差し引いた ものになる。 $D_{g1} \ge D_{g2}$ は実験結果のピーク値、



図-3.7 燃料噴射圧力による微小粒子の変化



図-3.8 燃料噴射圧力による微小粒子特性値の変化

 σ_{gl} と σ_{g2} は実験結果との調整のためのパラメータとした。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 燃料噴射圧力の影響

まず、燃料噴射圧力を変更した時の排気、燃料 消費率の特性と熱発生率を図-3.5、3.6に示す。燃 料噴射時期を固定して噴射圧力を増加させる時、 傾向として燃費、NOx は増加、Soot は低下する。 また、本機関においては THC は 100MPa の時に 最小値となっている。熱発生率については、噴射 圧力の増加によって燃焼初期の予混合的な燃焼 が増加し、相対的に拡散的な燃焼量が減少してい る。これは、噴射時期を-8.4deg.ATDCに固定して いるので、噴射圧力の増加によって噴射率が増加 し、噴射期間が短縮、着火遅れ期間中の燃料噴射 量が増加していることが原因であると考えられ る。また、着火遅れが短くなっていることがわか る。これは、燃料微粒化、蒸発の促進と迅速な混 合気形成によるものである。このように噴射圧力 の増加によって熱発生率と排気、燃費とも変化す る。NOx は高温ほど生成されやすいため、予混合 的な燃焼の増加で、拡散的な燃焼時の雰囲気温度 を増加させていることが NOx 増加の原因である。 燃費の悪化は燃焼の高温化に伴う熱損失の増加、 Soot の低減は噴霧内の局所的な空気過剰率の増 加による希薄化²⁵⁾の他に、拡散的な燃焼期間の短 縮が原因であると考えられる。

燃料噴射圧力を変更した時の SMPS による微 小粒子の計測結果を図-3.7 に示す。噴射圧力が増 加するに従って、100nm 付近にあるピークが減少 していき、10~30nm 付近のピークが増加してい る。全体的に噴射圧力の増加は 40nm までの微小 粒子を増加させ、粒径分布のモード値(最頻度値) を大きくすることがわかる。これまでのエンジン



図-3.9 2nd モード投影断面積と Soot の関係

開発・設計では、問題が生じなければ同一噴射量 を短期間で噴射でき、噴射時期に対する自由度が 増すことから、燃料噴射圧力は増加させる方向で 考えられてきている。しかし、微小粒子排出の観 点からは、何らかの対策が必要であることがわか る。図-3.8に計測された微小粒子の特性値として、 平均径、標準偏差、総粒子数を示す。粒径分布か らだけではなく、平均径でも噴射圧力の増加で粒 径が小さくなっていることが確認できる。但し、 100MPa 以上ではほとんど変わらない。標準偏差 は 80MPa でピークになっている。これは、図-3.7 に見られるように、噴射圧力の増加に伴って粒径 のモード値が100nmから30nmへの移行の途中の ため、両者の粒子個数がほぼ等しくなっているこ とが原因である。総粒子数は、平均粒径の低下と 共に増加している。また、図内には燃料噴射時期 を-8.4 から-3.5、1.5 deg.ATDC に変更した時の結 果も示している。噴射時期の遅延は、平均径、標



図-3.10 Soot 最小時(a)の粒径分布



図-3.11 Soot 最大時(b)の粒径分布

準偏差を低下、総粒子数を増加させるが、変化の 割合は小さい。

参考文献 12)から、accumulation モードの粒子 は炭素粒子の凝集体である。従って、スモーク計 によって計測される Soot と何らかの相関がある と考えられる。Soot[FSN]は、有効長(フィルタを 通して吸引される排気体積(大気圧、25℃)とフィ ルタ面積の比)が 405mmの排気がフィルタを通過 し、捕集物が付着したフィルタの反射率 R_b と付 着物のないフィルタの反射率 R_c から以下の式で 求められている ²⁶⁾。

$$Soot[FSN] = \left(1 - \frac{R_b}{R_c}\right) \times 10 \tag{3.4}$$

つまり、Soot はフィルタに捕集された Soot の投 影断面積と相関があると想定できる。SMPS で計 測された微小粒子は、前述の通り式(3.3)によって 2つの対数正規分布で表されているので、大粒径 側の 2nd モードの粒子の総投影断面積を求め、 Sootとの比較を行った。その結果が図-3.9である。 ここでは燃料噴射圧力の他に噴射時期を変更し ている。Soot として捕集されたフィルタ上の粒子 は個々の粒子が独立してフィルタ上にある訳で はなく、重なり合って存在していると考えられる が、Sootと 2nd モードの投影断面積には相関があ ることがわかる。噴射時期の遅延によって変更さ れる Soot 量に対しても、微粒子の投影断面積が 変化して同一線上で表せている。従って、2nd モ ードの粒子の増減が Soot の増減に対応している ことがわかり、Sootによって 2nd モードの粒子の 排出を予測・評価できる可能性があることを示し ている。本実験内において Soot が最小、最大と なった時の粒径分布を図-3.10、3.11 に参考までに 示す。Soot が最小の場合には 30nm にピークが、 最大の場合には100nmにピークがある。

図-3.7 に示したように、燃料噴射圧力を増加さ せることによって、小粒径側の粒子が増え、大粒 径側の粒子が減る。今回の解析では、小、大粒径 を各対数正規分布で表現しているため、これを利 用して生成メカニズムと小粒径の排出原因を検 討した。まず、粒子の凝集について検討する。粒 子の凝集はブラウン凝集によって表されること が知られている。定常状態における2種類の粒子 のブラウン凝集における衝突確率J[1/cm³s]は、

$$J_{ii} = K_{ii} N_i N_i \tag{3.5}$$

と表される²⁷⁾。Nは個数濃度、i, jはそれぞれの 粒子を表す。 K_{ij} はブラウン凝集係数²⁷⁾で、Fuchs によって以下のように求められた式が最も妥当 であると言われている。

図-3.12 ブラウン凝集係数 27)

$$Kn_i = \frac{2\lambda_{air}}{D_{pi}}, \quad \overline{C}_i = \left(\frac{8kT}{\pi m_i}\right)^{1/2}, \quad I_i = \frac{8D_i}{\pi \overline{C}_i}$$
 (3.7)

$$g_{i} = \frac{1}{3D_{\rho i}I_{i}} \left\{ \left(D_{\rho i} + I_{i} \right)^{3} - \left(D_{\rho i}^{2} + I_{i}^{2} \right)^{3/2} \right\} - D_{\rho i}$$
(3.8)

$$D_{i} = \frac{kT}{3\pi\mu D_{\rho i}} \left(\frac{5 + 4Kn_{i} + 6Kn_{i}^{2} + 18Kn_{i}^{3}}{5 - Kn_{i} + (8 + \pi)Kn_{i}^{2}} \right)$$
(3.9)

ここで、Kn は Knudsen 数、 \overline{C} は粒子の熱運動速 度、Dはブラウン拡散係数、kはボルツマン定数、 m は粒子質量、T は温度、l、 λ_{air} は粒子、空気分 子の平均自由行程、µは粘性係数である。これよ り、衝突確率は個数濃度と粒子径の関数になって いることがわかる。図-3.12²⁷⁾に粒子径によるブラ ウン凝集係数の変化を示す。ブラウン凝集係数は、 粒子径が等しい時に最も小さくなり、また粒子径 に差がある程、大きくなることがわかる。従って、 式(3.5)より粒子径は差があり、粒子数濃度が大き い程、衝突確率が増し、凝集しやすいことになる。 本実験による凝集の影響について、1st、2nd モー ド間の凝集を各特性値を使って検討した結果を 図-3.13 に示す。ここでは 1st モードの粒子数と 2nd モードの粒子数、平均径との関係を表してい る。噴射圧力の増加によって、1st モードの粒子 数は増加するが、2nd モードの粒子数はほとんど

図-3.13 1st, 2nd モードの粒子数と粒径の関係

図-3.14 1st モード粒子数と硫黄濃度, THC との関係

変わらないことがわかる。また、2nd モードの粒 径は小さくなっている。これより、2nd モードの 粒子数が1st モードの粒子数に比べて少なく、か つ2nd モードの粒径が小さくなり1st モードの粒 径との差も小さくなるため、100MPa以上の高圧 噴射時に計測された1st モードの粒子は、生成さ れた後、燃料噴射圧力が低い場合よりも大粒径粒 子に凝集されにくくなり、小粒子のまま残存して いると推定できる。 次に、1st モードの粒子の生成要因について検 討する。核生成モードの生成要因は、3.1 に示し たように揮発性炭化水素と硫黄化合物である。そ こで、各噴射圧力で、噴射時期が最も進角してい る-8.4deg.ATDC を基準として粒子数濃度を正規 化した粒子数濃度の増加率と排気中硫黄濃度と THC の関係を図-3.14 に示す。排気中硫黄濃度は 以下の式から求めた。

$$Sulfur concentration = \frac{W_{GAM} \times q_{mf}}{q_{mew}}$$
(3.10)

wGAM は燃料中硫黄質量分率[ppm]、q_{mf}は燃料流量 [kg/h]、q_{mew}は排気流量[kg/h]である。噴射圧力に よって、粒子数の増加率は異なるが、排気中硫黄 濃度と相関があることがわかる。それに対して、 THC とは相関がない。但し、THC 内にはメタン のような常温で気体の成分も含まれていること から、凝縮性炭化水素との関係については別途検 討が必要である。以上のことから、今回の実験で の1st モードの粒子数の増減には排気中硫黄濃度 が大きく影響していると推定できる。つまり、燃 料消費量もしくは燃料中硫黄分の低減、または過 給圧力上昇による供給空気量の増加によって1st モードの微小粒子の生成を低減できることを示 している。

3.3.2 pilot 噴射の影響

pilot 噴射を行った時の燃費・排気特性と熱発生 率について、図-3.15、3.16 に示す。燃料噴射圧力 の増加によって、NOx、燃費が増加、Soot が低下 するが、pilot 噴射を行うことで、NOx、燃費の同 時低減が可能になることがわかる。NOx と Soot の関係は pilot 噴射量、噴射時期、噴射圧力によ らずほぼ同一線上で整理できる。図-3.16 では pilot 噴射量 m_{pilot}50mm³、pilot-main 噴射間隔 Tint4.9deg.の時の熱発生率を pilot 噴射を行わない 場合と比較しているが、pilot 噴射は予混合ピーク を小さくし、噴射圧力による熱発生への影響を小 さくすることができる。また、-6deg.ATDC 付近 に pilot 噴射による熱発生が確認でき、pilot 噴射 を行わない場合と比べて main 噴射による熱発生 時期が進角すること、拡散的な燃焼のピークも減 少傾向にあることがわかる。

図-3.17に各燃料噴射圧力でのpilot噴射量を10、 50mm³、pilot-main 噴射間隔を4.9、22.7deg.とし た時の粒径分布を示す。pilot噴射の噴射量、噴射 時期によって、粒径分布が変化することがわかる。 pilot 噴射時期が main 噴射時期と離れている 22.7deg.の時にはpilot噴射を行わない場合と比較 して、30nm 付近の粒子数は多くなる。それに対 して、pilot-main の近接噴射を行うと粒子数は少 なくなる。pilot 噴射量を固定して、噴射間隔を変 更することを考えると、pilot 噴射量が多い方が粒 径分布の変化の割合が大きい。このような pilot 噴射量、噴射間隔による粒径分布への影響は、噴 射圧力を変更してもほとんど変わらない。噴射圧 力によって粒径分布が異なっているのは、pilot 噴射量 50mm³、噴射間隔 4.9deg.の時で、噴射圧 力 120、140MPa では 10nm 付近にピークができる が、100MPa の時にはピークが現れない。

pilot 噴射を行った時の粒径分布の特性値への 影響を図-3.18 に示す。横軸における噴射間隔 0

図-3.15 pilot 噴射による燃費・排気特性

図-3.16 pilot 噴射による熱発生率

は pilot 噴射を行わなかった時の結果を表してい る。pilot 噴射量が異なっても、pilot-main 噴射間 隔による平均径、標準偏差、総粒子数への影響は 噴射圧力100MPaでの近接噴射時の平均径を除い て定性的にほとんど変わらない。近接噴射を行う と、平均粒径は小さくなり、総粒子数も少なくな

る。pilot-main 噴射間隔が離れるに従って、その 効果が得られなくなり、pilot 噴射を行わなかった 状態に近づいていく。噴射圧力 100MPa、pilot 噴 射量 50mm³ の近接噴射において平均径が大きく なるのは、図-3.17(a)に示したように小粒径側の 粒子数が少なくなっているからである。

小粒径側の粒子数について検討するため、1st モードの粒子数の比較を行った。図-3.19 に各 pilot 噴射量、pilot-main 噴射間隔での 1st モード の粒子数の変化を示す。参考として、図-3.20 に 噴射圧力 100MPa、pilot 噴射量 50mm³、pilot-main 噴射間隔 4.9deg.での粒径分布を 1st、2nd モード

図-3.18 pilot 噴射による微小粒子特性値の変化

図-3.19 pilot 噴射による 1st モード粒子数の変化

図-3.20 実験結果の分布関数への変換例

に分けた時の結果を示す。この条件の時に、実験 を行った中で最も粒子数が少なくなっている。近 接噴射を行うと、pilot 噴射量によらず粒子数は減 少し、噴射間隔が開くことで pilot 噴射を行わな い時の粒子数に近づいていくことがわかる。これ は、図-3.18 に示した粒子の総粒子数と同じ傾向 を示している。pilot 噴射が多い 50mm³、噴射圧 力が低い 100MPa の方が微小粒子数を減らすこと ができる。また、pilot 噴射を行わない場合でも噴 射圧力が低い方が粒子数は少なくなっている。

4. まとめ

舶用ディーゼル機関からの有害排気物質低減 のための燃焼改善技術としての高過給化による 高圧雰囲気化と燃料噴射制御に着目し、NOx と微 小粒子に対する影響について検討し、以下の知見 を得た。

- 高圧雰囲気場での NOx 生成について
 急速圧縮装置を用いて、雰囲気圧力を
 5.5~14.5MPaまで変更し、雰囲気圧力、燃料噴射圧力、酸素濃度が NOx 生成および熱発生率
 に及ぼす影響について調べた。
 - 火炎の壁面衝突の影響は、熱発生率、総熱 発生量、NOx 生成量よりも、CO 生成量に 表れる。
 - (2) COをほとんど生成しない領域まで雰囲気 圧力を増加させれば、NOx は雰囲気圧力 を増加させるほど低下する。
 - (3) 雰囲気圧力の増加は、熱発生率の予混合的 な燃焼割合を減少させる。一方、火炎到 達距離と噴孔から火炎までの距離は短く なるため火炎の存在位置が噴孔側に近く なり、火炎体積は小さくなる。
 - (4) 燃料噴射量、噴射圧力、雰囲気酸素濃度を 変更したが、雰囲気圧力に対する単位燃料質量あたりの NOx 生成量は全て同じ傾向を示し、圧力の増加によって NOx は増加し、ある圧力で最大値になった後、低下する。この原因は NOx が量論比付近で最大になることであり、雰囲気圧力増加による噴霧内空気過剰率の増加によって噴霧内の燃料過濃領域が減り、量論領域、更に希薄領域になっていくためである。 また、CO 生成量はシリンダ内空気過剰率によって整理できる。
 - (5) 雰囲気酸素濃度の低下は、火炎到達距離と 噴孔から火炎までの距離を長くする。ま た、火炎発生時期は遅れ、火炎体積は大 きくなる。
- ・燃料噴射制御による微小粒子の排出について 舶用ディーゼル機関において高圧噴射、pilot 噴射を行った時のナノ粒子排出特性について 調べた。
 - (1) 大気中エアロゾルに対して用いられている2つの対数正規分布の和を使って、ディーゼル機関から排出される微粒子のbimodalな粒径分布を表した。この2つの対数正規分布の特性値を使って、大小粒径の性質を解析することができた。
 - (2) 燃料噴射圧力の増加は、平均粒径を小粒径 化し、総粒子数を増加させる。また、 10~30nm と 70~100nm に粒子数のピーク 値があり、噴射圧力を増加することによ って 70~100nm の粒子を減少させ、

10~30nm の粒子を増加させる効果がある。

- (3) 2 つの対数正規分布の大粒径側の粒子投影 断面積の総和は、Soot 排出量に比例する。
- (4) pilot 噴射を main 噴射に近接して行い、かつ pilot 噴射量を大きくすることで、小粒径側の粒子数を減少することができる。

謝 辞

3章のディーゼル燃焼のおける火炎の可視化撮影 に用いた高速度ビデオについては、株式会社ナック のご協力を賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば J. D. Naber, D. L. Siebers, Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays, SAE paper 960034
- 2) 北村泰隆、他3名、過給条件下での噴霧燃焼 における NOx 生成に関する基礎的研究、日本 機械学会論文集 B 編 72 巻 713 号 (2006)、 pp.202-207
- 八房智顕、他5名、過給・スワール強度・燃料噴射圧力がディーゼル噴霧の発達および燃焼に及ぼす影響、自動車技術会論文集、 Vol.40 No.3(2009)、pp.755-761、20094382
- S. Kobori, et. al., A study of ignition delay of diesel fuel sprays, Int. J. Engine Research, Vol.1 No.1 (2000), pp.29-39
- 5) 小堀繁治、横須賀篤、高過給ディーゼル機関の着火遅れに関する研究、日本機械学会論文集 B 編 69 巻 684 号(2003)、pp.1966-1971
- C. Crua, et. al., Diesel autoignition at elevated in-cylinder pressures, Int. J. Engine Research, Vol.5 No.4 (2004), pp.365-374
- 7) 藤本元、佐藤豪、定容燃焼装置によるディー ゼル機関の燃焼に関する研究(第2報 燃焼 仮定を示す各種の経過時間、とくに火炎発生 遅れについて)、日本舶用機関学会誌、Vol.12 No.12 (1977)、pp. 873-880
- 8) 魯錫洪、他3名、急速圧縮膨張装置によるディーゼル燃焼に関する研究:第1報 高温および高密度雰囲気における熱発生率、日本機械学会論文集 B 編 57 巻 534 号 (1991)、 pp.740-743
- 9) 小堀繁治、 神本武征、ディーゼル機関の基礎 燃焼実験のための急速圧縮膨張装置の開発、 日本機械学会論文集 B編62巻593号 (1996)、

pp.392-397

- 10) 井亀優、他9名、舶用ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)の計測とその排出特性、海上技術安全研究所報告、第11巻第2号(平成23年度)、pp.91-110
- 11) 安藤裕友、他6名、舶用ディーゼルエンジン の排ガス中に含まれる有害物質に関する分析、 海上技術安全研究所報告、第11巻第2号(平 成23年度)、pp.111-126
- D.B. Kittelson, Engines and Nanoparticles: A Review, J. Aerosol Sci., Vol.29, No.5/6(1998), pp. 575-588
- H. Jung, et. al., The Influence of Engine Lubricating Oil on Diesel Nanoparticle Emissions and Kinetics of Oxidation, SAE paper 2003-01-3179
- 14) Z. G. Liu, et. al., Influence of Engine Operating Conditions on Diesel Particulate Matter Emissions in Relation to Transient and Steady-State Conditions, Environ. Sci. Technol. 41(2007), pp 4593-4599
- 15) 久保修一、他3名、ディーゼル車両排出ナノ 粒子の生成特性、日本機械学会論文集 B 編 72 巻 723 号(2006-11)、pp. 2612-2618
- 16) 久保修一他、他4名、車両排出揮発性ナノ粒子の詳細物性、日本機械学会論文集 B 編 72
 巻 723 号(2006-11)、pp. 2619-2625
- 17) V. Scheer, et. al., Composition of Semi-volatile Particles from Diesel Exhaust, SAE paper 2005-01-0197
- A. Kasper, Particulate Emissions from a Low-Speed Marine Diesel Engine, Aerosol Science and Technology, 41(2007), pp. 24-32
- U. Mathis, et., al., Influence of Diesel Engine Combustion Parameters on Primary Soot Particle Diameter, Environ. Sci. Technol., 39(2005), pp. 1887-1892
- 20) T. Lähde, et. al., Effect of Fuel Injection Pressure on a Heavy-Duty Diesel Engine Nonvolatile Particle Emission, Environ. Sci. Technol., 45(2011), pp. 2504-2509
- 21) M. Stumpf, et. al., Investigation of Soot Concentration and Particle Size Distribution on a Single Cylinder Diesel Engine, Proc. ASME ICEF2007, paper No. ICEF2007-1709
- 22) D. L. Siebers, et. al., Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions, SAE paper 2001-01-0530
- 23) 和栗雄太郎、他3名、ディーゼル機関燃料噴 霧の到達距離に関する研究、日本機械学会論

文集 25 巻 156 号(1959)、pp.820-826

- 24) J.H. Seinfeld, et. al., Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd Edition(2006) John Wiley & Sons Inc., pp.370
- 25) 中村兼仁、他1名、ディーゼルエンジン用コ
 モンレールシステム(2)、エンジンテクノロジ
 ー、5巻1号 (2003)、pp.94-99
- 26) ISO 10054: 1998, Internal combustion

compression-ignition engines – Mesurement apparatus for smoke from engines operating under steady-state conditions – Filter-type smokemeter

27) J.H. Seinfeld, et. al., Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd Edition(2006) John Wiley & Sons Inc., pp.596-603