

ガソリン混合軽油によるディーゼル排煙低減効果

石 田 正 弘* ・ 田 貝 哲 哉*
植 木 弘 信**

Effect of Gasoline / Gas-Oil Blend on Smoke Reduction in a DI Diesel Engine

by

Masahiro ISHIDA*, Tetsuya TAGAI* and Hironobu UEKI**

In order to reduce smoke in a diesel engine, combustion test was conducted by using gas-oil blended with gasoline having a lower distillation temperature. It was found that smoke was decreased by about 80% in the low load case and about 50% in the high load case as the blending ratio of gasoline and gasoil increased to about unity. The soot particle size was estimated by analyzing the soot-formation and -oxidation processes based on the two-zone model. Analytical result shows that smoke is reduced mainly due to a decrease in soot particle size based on the lower evaporation temperature as well as the longer ignition delay based on gasoline blending.

Key words: Diesel Engine, Gasoline Blend, Smoke, Soot Size, Two Zone Model Analysis

1. まえがき

厳しい排ガス規制に対処するため、小型直噴ディーゼル機関では、燃焼室内での燃料の均質化・希薄化を目指した希薄予混合燃焼法が種々提案された。それらの中で、天然ガス均一混合気軽油アシスト着火⁽¹⁾、ブタンおよびDMEの均一混合気圧縮着火⁽²⁾、LPG混入軽油⁽³⁾、ブタンや軽油を混入したDME直噴⁽⁴⁾、蒸発特性および着火性の異なる2種燃料を組合せる燃料設計⁽⁵⁾などは、低沸点燃料を用いることによって予混合化を促進し、排気の改善を行うものである。同様に、部分的予混合化を促進するため、米谷ら⁽⁶⁾は軽油直接噴射機関に対するガソリン予混合気の影響を調べたが、未燃炭化水素排出率の増加および高負荷におけるディーゼルノック的現象などの問題が指摘された。

本研究では、上記の問題を解決するためにガソリンと軽油の混合燃料を筒内へ直接噴射することを提案し、低沸点・低セタン価のガソリンと高沸点・高セタ

ン価のディーゼル軽油の混合燃料について、ガソリン混合割合、噴射時期、機関負荷などが、着火遅れ、予混合燃焼およびNO_x、すす、未燃炭化水素などの排出率に及ぼす影響を実験的に調べた。また、ガソリン混合燃料による排煙低減効果を、燃料の低沸点化効果と低セタン化効果に分離するため、ガソリン混合に基づく着火遅れ増大を着火促進剤を用いて短縮することによって、排煙に対する低沸点化効果を抽出した。一方、ガソリン混合に基づく燃焼時間履歴の変化を筆者ら⁽⁷⁾の2領域モデルを用いて解析し、NO_xの生成過程およびすすの生成・酸化過程の解析によって推算されたすす粒径の変化から、ガソリン混合に基づく排煙低減効果を明確にした。

2. 実験装置および実験方法

供試機関として、自動車用水冷4サイクル直接噴射式無過給ディーゼル機関(ボア93[mm]、ストローク

平成16年4月16日受理

*生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

**機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

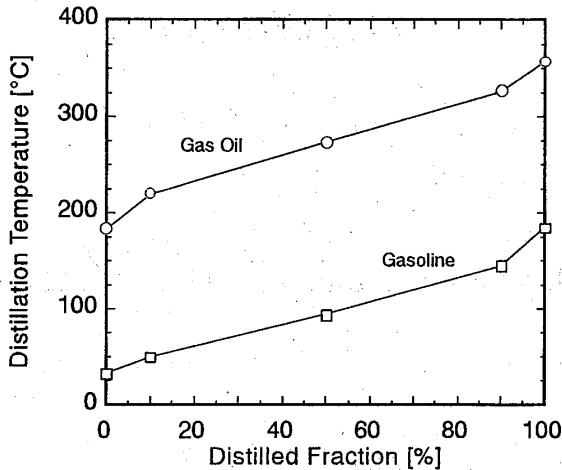
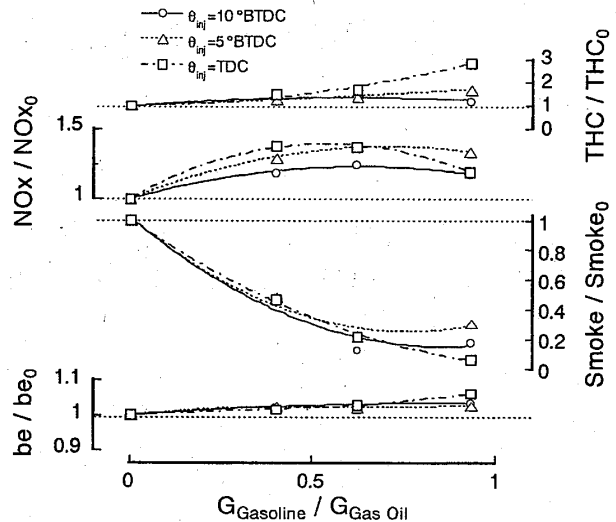


Fig. 1 Distillation characteristics of test fuels

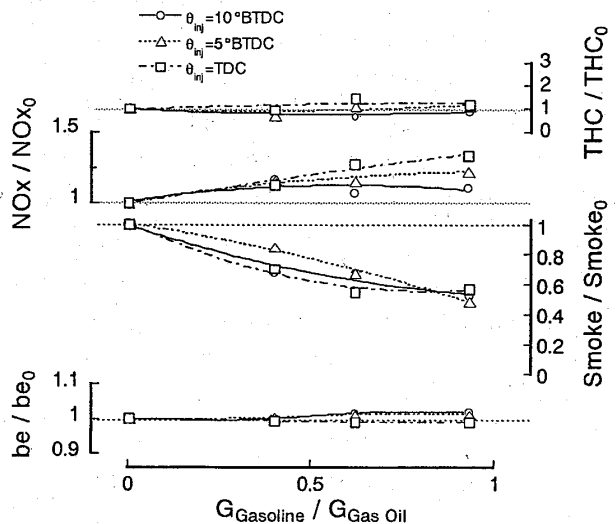
102[mm], 4気筒, 圧縮比18.2, 最大出力64.7[kW] (88[PS]/3400[rpm]): いすゞ自動車(株)製4JB1-2型)を, 噴射ノズルには噴孔径0.28[mm], 噴孔数4穴, 等ピッチの多噴孔ノズルを用いた. なお, ノズル開弁圧は18.1[MPa]とした. 実験では, 機関回転速度を $1,700 \pm 5$ [rpm], 機関入口吸気温度を電気ヒーターにより 40 ± 0.5 [°C], 機関入口吸気圧力は予圧送風機により標準大気圧にそれぞれ一定に保ち, 燃料噴射時期 θ_{inj} は上死点前 10° , 5° および上死点の3とおり, 正味平均有効圧Pmeは低負荷の0.33[MPa]から高負荷の0.66[MPa]まで間で4とおりの条件で, ガソリンと軽油の混合比率を変化させた. 基準の供試燃料はJIS2号軽油および市販の100オクタンガソリンで, それぞれの蒸留特性を図1に示す. ガソリン/軽油の体積混合比が0/100, 30/70, 40/60および50/50(重量比; $G_{GS}/G_{GO} = 0, 0.40, 0.62, 0.93$)の4種を供試燃料とした. なお, 軽油の正味発熱量は42.91[MJ/kg], ガソリンのそれは44.25[MJ/kg]で, 図中では軽油換算燃費を表示した. また, 着火促進剤として, エチル社のジエチルヘキシルナイトレート(2EHN)を主成分とする燃料添加剤を用いた.

3. 実験結果および考察

図2(a), (b)は, 未燃炭化水素 THC, 窒素酸化物 NOx, 排煙濃度 Smoke および燃料消費率 be のガソリン/軽油混合比による変化を示す. パラメータは噴射時期 θ_{inj} である. いずれの値もガソリン混合割合がゼロの場合の値で無次元化しており, ガソリン体積混合比50/50($G_{GS}/G_{GO} = 0.93$)の場合, 排煙の低減率は低負荷で約80%, 高負荷で約50%に達するが, NOx はいずれの負荷においても増加している. ガソリン混



(a) Pme = 0.33 MPa



(b) Pme = 0.66 MPa

Fig. 2 Change in engine performance and exhaust emissions due to gasoline/gas-oil blend

合比の増加によって, 低負荷では THC の増加とともに燃費がやや増加するが, 高負荷では THC, 燃費ともにほとんど増加しない. すなわち, ガソリン混合燃料によって排煙の低減は顕著に得られるが, NOx 低減策が別途必要である. 図3(a), (b)は燃焼時間履歴のガソリン混合比に基づく変化を $\theta_{inj} = 5^\circ$ BTDC]の場合を一例として示す. P[MPa]は筒内圧力, $dQ/d\theta$ [J/deg]は熱発生率, Lift[mm]は針弁リフト量である. また, 図4はガソリン混合比に基づく着火遅れの変化を示す. ガソリンが低沸点であること, かつ低セタン価のガソリン混合比の増加とともに着火遅れが増加することの2つの要因により予混合気形成が促進され, 低・高負荷とも予混合燃焼の熱発生率が顕著に増加し, 拡散燃焼量が減少している. このため排煙が顕著

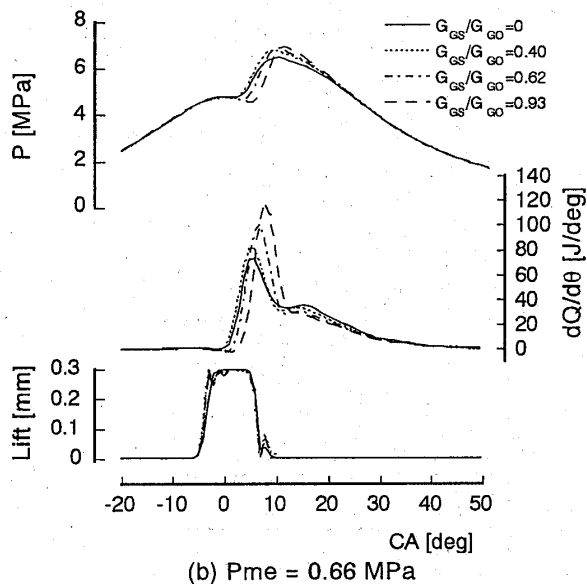
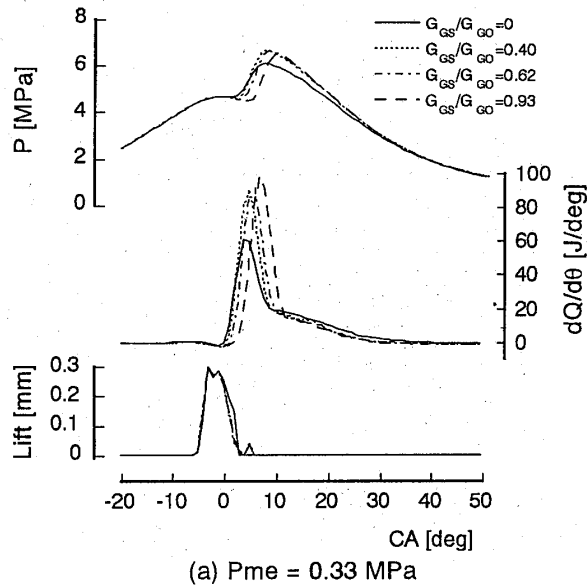


Fig.3 Change in combustion history due to blending ratio of gasoline/gas-oil ($\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

に低減されたが、一方、最高燃焼圧力、最高燃焼温度が高くなり NO_x は増加している。ガソリン混合に基づく低沸点化による排煙低減効果を抽出するために、着火促進剤(2EHN)を添加することによって着火遅れの短縮を試みた。図5、6および7は、いずれも着火遅れが最も大きいガソリン体積混合比50/50($G_{GS}/G_{GO}=0.93$)、低負荷 $P_{me}=0.33$ [MPa]、噴射時期 $\theta_{inj}=TDC$ の場合に得られた結果を示す。図5は燃焼時間履歴の変化を、図6は着火遅れへの影響、および図7は排煙濃度への影響を示す。着火促進剤添加率が僅か0.5%で着火遅れが約 3° 短縮され、また添加率1%では約 4° 短縮され、ガソリンを混合しない軽油の着火遅れにはほぼ近づいている。着火促進剤添加によって、ガ

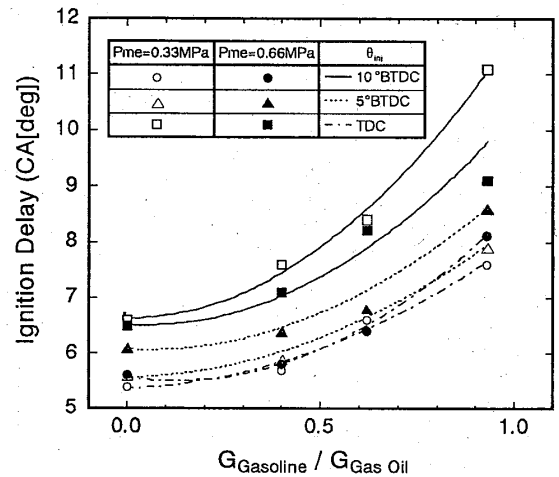


Fig.4 Change in ignition delay due to gasoline/gas-oil blend

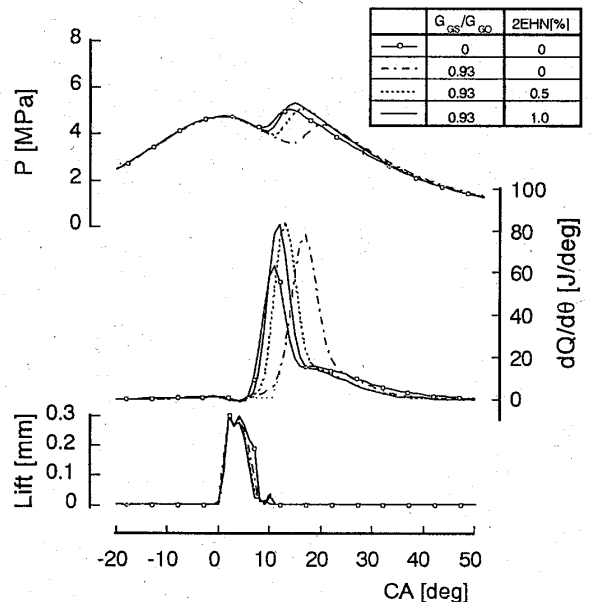


Fig.5 Change in combustion history due to ignition improver ($P_{me}=0.33$ MPa, $\theta_{inj}=TDC$)

ソリン混合燃料の着火遅れは短縮されても、予混合燃焼熱発生率のピーク値は減少しない。図5に示す添加率1%の場合、軽油の場合とほぼ同じ着火遅れであっても、 $G_{GS}/G_{GO}=0.93$ の混合燃料の熱発生率のピーク値は軽油のそれより顕著に高い。このことはガソリンの混入に基づく燃料の低沸点化の影響を示している。

図7に示すように、着火促進剤添加率の増加とともに排煙濃度が増加している。ガソリン体積混合比50/50($G_{GS}/G_{GO}=0.93$)の混合燃料の排煙濃度は基準の軽油に比べて約80%低減されたが、着火促進剤1%添加した場合、その低減率は半減している。すなわち、ガソリン混合燃料による排煙低減効果は、第1にガソリンの低沸点特性に基づくものと、第2にガソリンの低

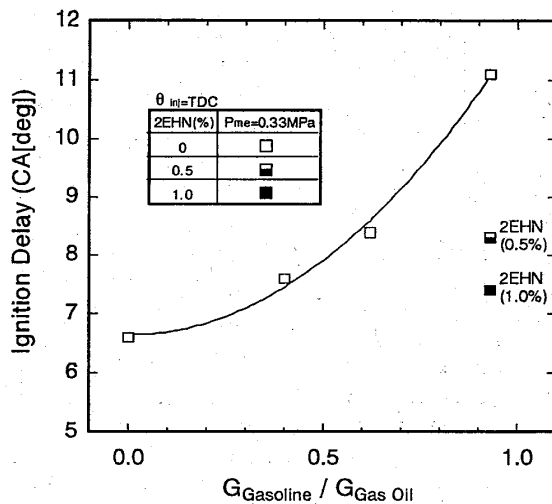


Fig. 6 Reduction of ignition delay due to ignition improver ($P_{me} = 0.33$ MPa, $\theta_{inj} = TDC$)

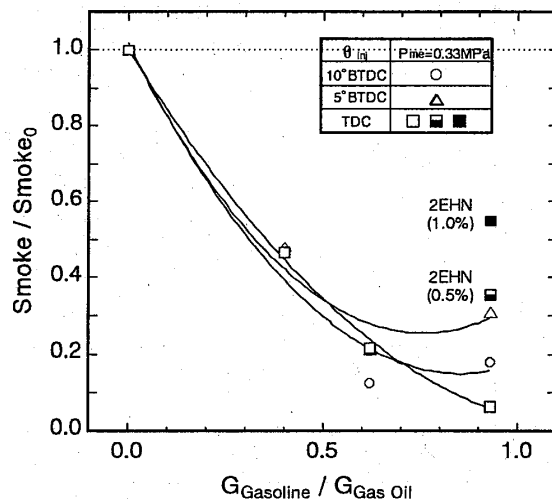


Fig. 7 Reduction of smoke due to gasoline / gas-oil blend ($P_{me} = 0.33$ MPa)

セタン価による着火遅れの増大に基づくものがあり、両者はほぼ同程度寄与していることが分かる。

4. 2 領域モデルによる解析

4.1 すすの生成・酸化モデル

Kazakov & Foster⁽⁸⁾によって提案されたすす生成の9段階モデルもあるが、Morel & Keribar⁽⁹⁾が提案した2段階モデルが簡便で、多くの適用例があるHiroyasu & Kadota⁽¹⁰⁾のモデルとも類似している。ここでは、すすの正味生成率 $(dS/dt)_n$ を推定するため、すす生成率 $(dS/dt)_f$ およびすす酸化率 $(dS/dt)_b$ について、それぞれ以下に示すMorelら⁽⁹⁾のモデルを採用した。

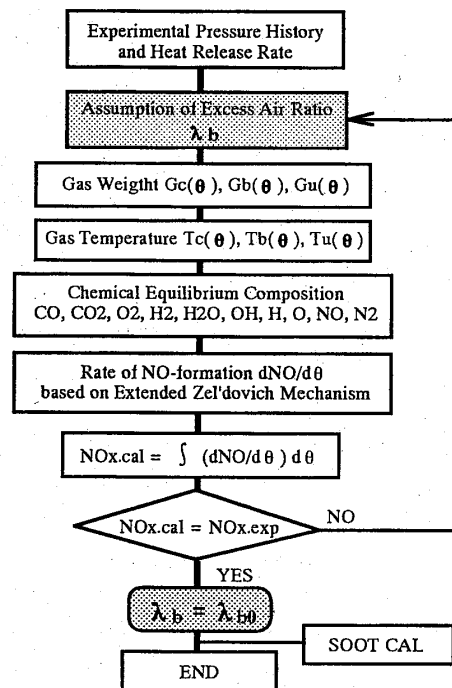


Fig. 8 Flow chart of NOx analysis based on two-zone model

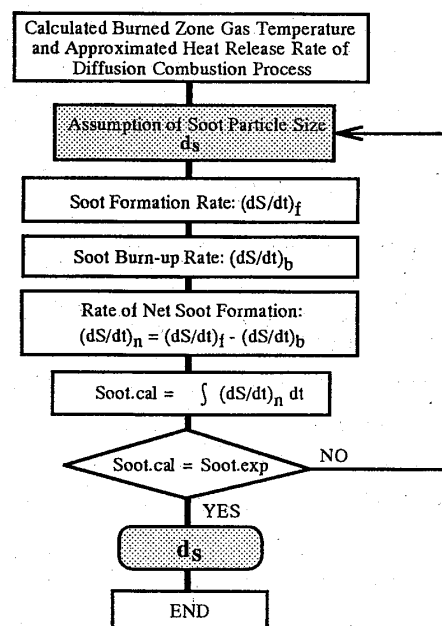


Fig. 9 Flow chart of smoke analysis based on two-zone model

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

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

$$(dS/dt)_n = (dS/dt)_f - (dS/dt)_b \quad (3)$$

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

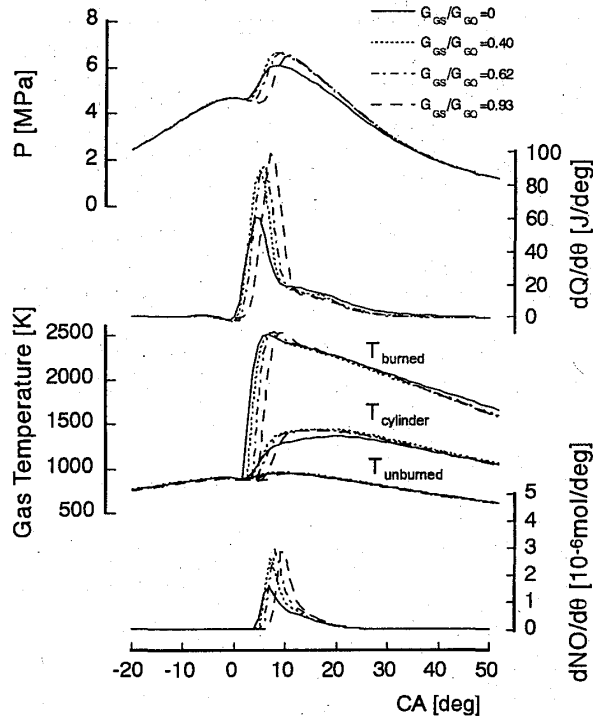


Fig. 10 Time histories of gas temperature and NO-formation rate
(Pme=0.33 MPa, $\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

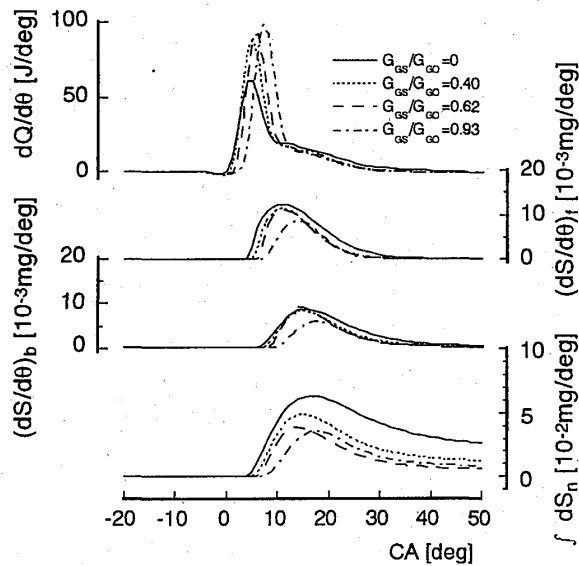


Fig. 11 Rate of soot-formation and -oxidation
(Pme=0.33 MPa, $\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

関数⁽¹¹⁾で近似した。 T_b は燃焼域ガス温度, T_{rad} は文献(8)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, ρ_s はすすの密度, d_s はすす粒径である。式中の定数として, $A_1=0.1$, $A_2=3,000$, $B_1=0.254$, $B_2=10,000$ を採用した。なお, 供試機関の運転条件を変化した場合のすす粒径の相対的变化を評価

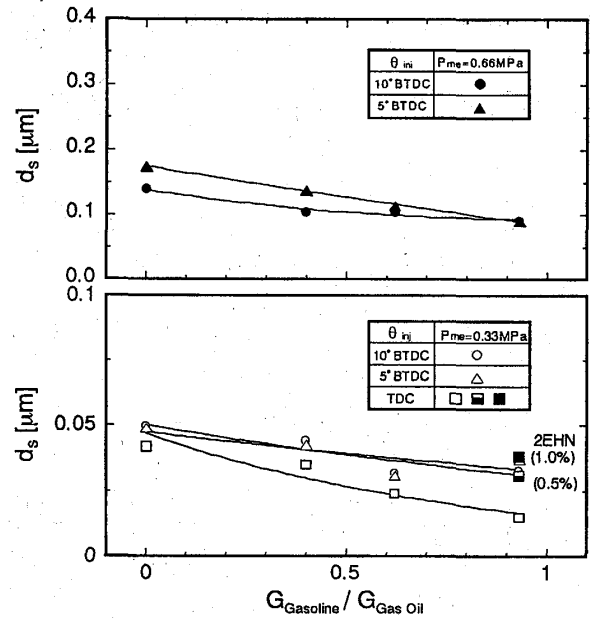


Fig. 12 Estimated soot particle size based on two-zone model analysis
(Pme=0.33, 0.66 MPa)

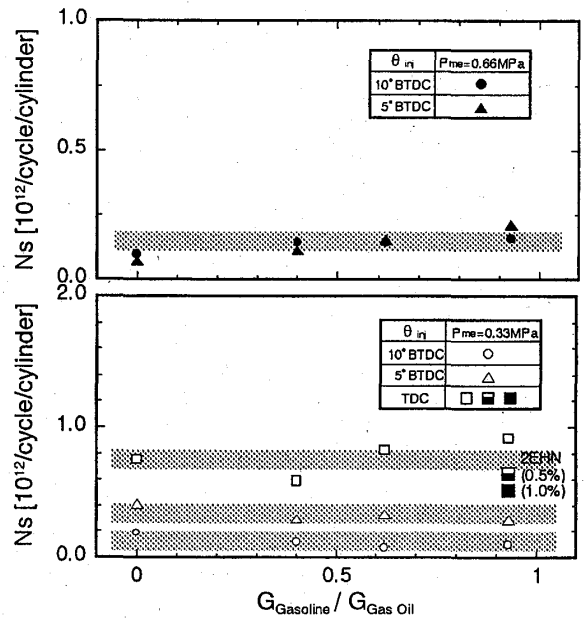


Fig. 13 Estimated number of soot particle
(Pme=0.33, 0.66 MPa)

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=0.33[MPa], 噴射時期 $\theta_{inj}=10^\circ$ BTDCにおける実験条件でのすす粒径を便宜上0.05[μm]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係数 B_1 を決定した。

2領域モデル解析では, 図8および9に示すフロー

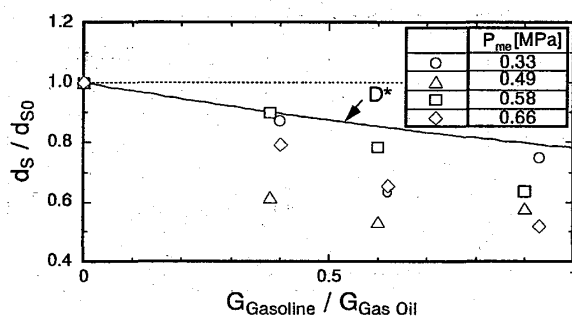


Fig. 14 Rate of soot particle size reduction due to gasoline / gas-oil blend ($\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

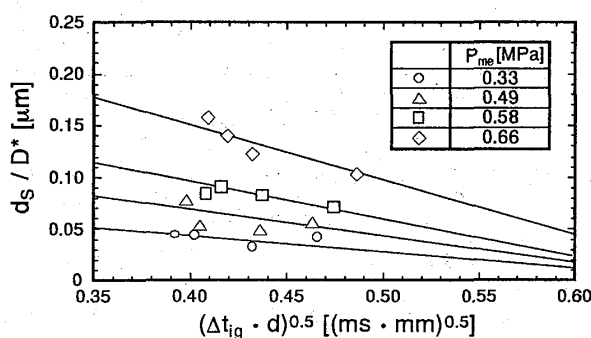


Fig. 15 Relationship between reduced soot particle size and penetration length for ignition delay ($\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

チャートに従って、まず NOx の計算値が実測値と一致するように試行錯誤法で燃焼域空気過剰率 λ_{b0} および燃焼域ガス温度 T_b を確定し、次いで、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。なお、この計算手法は、ノズル噴孔径縮小に伴うすす粒径の変化を解析するために筆者ら⁽¹²⁾によって提案されたものと同じである。

図10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。ガソリンの混合によって最高熱発生率が顕著に増加し、NO 生成率が増加していることが分かる。また、図11はすすの生成率 $(dS/d\theta)_t$ 、酸化率 $(dS/d\theta)_b$ および筒内正味すす量 $\int (dS/d\theta)_n d\theta$ 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機関から排出さ

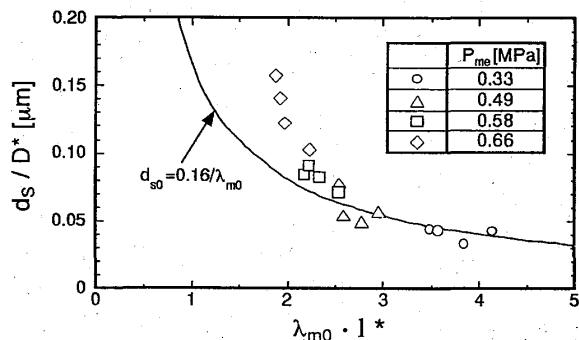


Fig. 16 Relationship between reduced soot particle size and reduced excess air ratio ($\theta_{inj}=5^\circ$ BTDC)

れるすす量 [mg/cycle/cylinder] であり、その値は実測の排出すす量と一致させている。実測の排出すす量と算定されたすす粒径から、次の関係を用いてすす粒子数 N_s を算定した。

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

図12は算定されたすす粒径 d_s を示し、また、図13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ガソリン混合割合を増加した場合にすす粒径が減少する傾向は、低負荷、高負荷ともに同様であるが、高負荷でのすす粒径は低負荷の値よりかなり大きい。一方、すす粒子数はすす粒径の推定精度に強く影響されてデータにばらつきがあるが、図から判断するとガソリン混合によってすす粒子数はあまり変化しないものと推定される。なお、低負荷で噴射時期を遅延するほどすす粒子数が顕著に増加するのは燃費の増加すなわち燃料噴射量の増加に起因している。

4.2 ガソリン混合割合とすす粒径の関係

図14はすす粒径のガソリン混合割合に基づく減少率を示す。なお、縦軸の値は軽油のみの場合のすす粒径の実測値 d_{s0} で無次元化しており、パラメータは機関負荷 ($P_{me}=0.33, 0.49, 0.58, 0.66$ [MPa]) である。また、図中の曲線 D^* は、油粒からガソリン分を除去し軽油だけとして想定される換算油粒径 D_{G0} と混合燃料の油粒径 D の比であり、油粒体積は油粒径の 3 乗に比例するから D^* は次式で表される。

$$D^* = D_{G0}/D = [1/\{1 + (G_{GS}/G_{GO})(\rho_{GO}/\rho_{GS})\}]^{1/3} \quad (5)$$

図1に示したように、ガソリンの最終蒸留温度は軽油の初留温度とはほぼ同じであるから、ガソリン成分は油粒の飛行中に全て蒸発してすすの生成には関与しな

いものと仮定し、また、初期の噴霧油粒径がガソリン混合割合によって変わらないとすれば、すす生成に与する初期油粒径がガソリン混合割合分だけ小さくなる。また、油粒径に比例してすす粒径が変化すると仮定すると、図14のD*の実線で示すように油粒径は小さくなる筈であり、例えばガソリン体積混合比50/50の場合には油粒径は約20%小さくなる筈である。しかしながら、実測のすす粒径の減少率はすべてD*曲線より下方に位置し、かつ、データにはかなりばらつきがあるが、D*曲線で示す燃料の低沸点化に基づくすす粒径予測減少率のおおよそ2倍も減少している。

4.3 噴霧到達距離とすす粒径の関係

噴霧先端の油粒径は燃料の蒸発特性に強く影響を受けるから、前述の燃料中の低沸点成分の割合に加え、油粒の噴霧到達距離が因子として考えられる。図4に示したように、ガソリンの混合割合の増加によって着火遅れが顕著に増加しており、着火遅れ期間の噴霧到達距離が長いほど油粒の蒸発が促進され噴霧先端油粒径は小さくなると考えられる。図15は、ガソリン混合に基づく低沸点化効果を除去した修正すす粒径 d_s/D^* に及ぼす噴霧到達距離の影響を示す。和栗ら⁽¹³⁾の運動量理論によれば、着火遅れ期間の噴霧到達距離は噴孔径を d [mm]、着火遅れを Δt_{ig} [ms] とすれば $(\Delta t_{ig} \cdot d)^{0.5}$ に比例するので、図15の横軸としてこの値を採用しているいずれの負荷においても、噴霧到達距離の増加とともにすす粒径が減少するが、負荷が大きいほど修正すす粒径 d_s/D^* は大きな値を示している。

図16はすす粒径 d_s と筒内平均空気過剰率 λ_{m0} の関係を示す。図中の実線は Morel & Keribar⁽⁸⁾ が示した関係である。なお、縦軸はガソリン混合割合を補正した修正すす粒径 d_s/D^* 、また、横軸は低セタン化に基づく噴霧到達距離の変化を補正した修正平均筒内空気過剰率 $\lambda_{m0} l^*$ (ただし、 $l^* = \{(\Delta t_{ig} \cdot d) / (\Delta t_{ig} \cdot d_0)\}^{0.5}$ 、添字 0 = 軽油のみの場合) である。筒内平均空気過剰率 λ_{m0} の減少は負荷の増加と対応しており、負荷が増加するほどすす粒径が増加する傾向は Morel らが示したものと定性的に一致するが、低負荷では両者の値がほぼ一致するのに、高負荷では本実験の推定すす粒径は Morel らの値より著しく大きくなっている。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強く受けるであろうし、また、着火遅れが長い場合には噴霧がピストンキャビティの壁面に衝突する。このような場合には、すすの生成が本2領域モデルで想定している燃焼域ではなく壁面近傍においてもかなり生成されること、かつ、高負荷で

は平均空気過剰率が十分大きくないため局所的に燃料過剰な場所が生じることなどがその理由として考えられる。

5. むすび

ガソリン・軽油混合燃料による排煙低減効果を、実験および2領域モデルを用いたすす粒径解析によって明かにした。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 体積混合比50/50のガソリン・軽油混合燃料により、低負荷で約80%、高負荷で約50%の排煙が低減された。
- (2) ガソリン混合燃料による排煙低減は、低沸点成分の増加により予混合気形成が促進されること、および低セタン化により着火遅れが増大して予混合気形成がさらに促進されることに基づいている。
- (3) 低沸点化による油粒の蒸発促進の結果としてすす粒径が小さくなり、また、低セタン化による着火遅れの増大、噴霧到達距離の増大によりすす粒径が小さくなる。

終りに、本研究に尽力された松岡貴範君、篠田智君(当時、長崎大学大学院工学研究科、現在、日産自動車(株)、日産ディーゼル(株))に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) Kusaka, J., Daisho, Y., Kihara, R. and Saito, T., Proc. of 4th COMODIA (1998), pp.555-560
- (2) Takatsuto, R., Igarashi, T. and Iida, N., Proc. of 4th COMODIA (1998), pp.185-190
- (3) 池田光優・ほか2名, 機論, B編, 64-625(1998), pp.3126-3132
- (4) Kajitani, S., ほか2名, SAE Paper, 982536(1998)
- (5) Senda, J., ほか4名, SAE 2000 Trans., J. of Fuels and Lubricants (2000), pp.835-847, Paper No.2000-1-1258
- (6) 米谷宏明・福谷格, 自技論, 25-4(1994), pp.35-40
- (7) Ishida, M., ほか4名, JSME Intl. J.(B), 39-1(1996), pp.185-192
- (8) Kazakov, A. and Foster, D.E., SAE Paper, 982463 (1998)
- (9) Morel, T. and Keribar, R., SAE Paper, 860445 (1986)
- (10) Hiroyasu, H. and Kadota, T., SAE Paper, 760129 (1976)
- (11) Miyamoto, N., ほか3名, SAE Paper, 850107 (1985)
- (12) 石田正弘・ほか2名, 機論, B編, 67-653(2001), pp.280-287
- (13) 和栗雄太郎・ほか3名, 機論, 25-156(1959), pp.820-826