軽油性状が直噴ディーゼルエンジンからの大気汚染物質に及ぼす影響*

赤坂行男^{*1}, 桜井嘉人^{*2}

Effects of Fuel Properties on Exhaust Emission from DI Diesel Engine

Yukio AKASAKA and Yoshihito SAKURAI

Exhaust emissions (HC, CO, NO_x, PM, and polycyclic aromatic hydrocarbons in PM) from a commercial DI diesel engine were measured for petroleum-derived fuels with a wide range of fuel properties. Fuel properties such as cetane number, aromatic content and type, and distillation temperature were independent of each other. The test results showed that PM and NO_x depended predominantly on aromatic content, especially polycyclic aromatic content, in fuel. PAH emission was also strongly affected by polycyclic aromatic content. The amount of sulfate in PM was proportional to sulfur content in fuel. The cetane number seldom affected the amount of PM and NO_x emissions.

Key Words: Diesel Engine, Exhaust Emission, Fuel, Particulate

1. ま え が き

わが国の大気環境は排出ガス規制の強化にもかかわらず依然として改善されていない⁽¹⁾。そこで、ディーゼル車からの大気汚染物質(以下、排出物と記す)を低減するために、エンジンの改良や排気処理装置の装着に加えて軽油性状の最適化による排出物の低減が強く望まれている。一方、軽油性状と排出物との関係については多数の優れた研究が報告されているが^{(2)~(16)}、広範囲の軽油性状を互いに独立変数として取扱うことのできる供試燃料を用いて規制対象排出物(HC, CO, NO_x, PM)および未規制排出物である多環芳香族(PAH)を同時に測定した研究は見当たらない。

本研究では、軽油性状として重要なセタン価、芳香族量とタイプ、分留性状を独立に変えた供試燃料を用いて市販直噴ディーゼルエンジンからの規制対象排出物を測定し、軽油性状との関係を統計的に解析する。また、PAHの測定法を確立し、PAHに及ぼす軽油組成の影響を検討する。

2. 実 験

2.1 供試燃料 軽油性状と規制対象排出物の関係を検討するために、排出物への影響が大きい芳香族、揮発性(90%留出温度)、セタン価を独立に変化させた以下の3シリーズの供試燃料(AMシリーズ, DSシリーズ, CNシリーズ)を調製した。また、硫黄分のPMへの影響を把握するために硫黄分を1ppm~0.4%まで変化した。供試燃料性状を表1に示す。

(1) 芳香族を変えた場合(AMシリーズ) 軽油組成の排出物に及ぼす影響を調べるために、直留軽油基材に脂肪族石油系溶剤または分解系軽油基材を混合し、芳香族含有量を1.4~52.8%まで変化した供試燃料AM-1~AM-4、環状飽和化合物を28%混合した供試燃料AM-5、三環以上の芳香族を除いた供試燃料AM-6、二環以上の芳香族を除いた供試燃料AM-7を調製した。なお、供試燃料のセタン価はナイトレート系セタン価向上剤を用いて59~64に調製した。

(2) 分留性状を変えた場合(DSシリーズ) 分留性状の影響を調べるために、セタン価と芳香族含有量を一定に保ちつつ直留軽油基材を分留して90%留出温度を248°Cから338°Cまで変化した。

(3) セタン価を変えた場合(CNシリーズ) セ

* 原稿受付 1996年7月31日。

*¹ 正員, JOMO テクニカルリサーチセンター(☎ 335 戸田市新曽南3-17-35)。*² JOMO テクニカルリサーチセンター。

Table 1

(a) Test fuel properties (AM Series)

Item	Sample	AM-1	AM-2	AM-3	AM-4	AM-5	AM-6	AM-7
Density @15°C		0.8020	0.8293	0.8545	0.8828	0.8067	0.8160	0.8160
Distillation (°C)								
IBP		253.0	227.0	220.5	212.5	251.0	224.0	236.5
50%		287.0	281.0	269.0	260.5	272.0	277.5	287.5
90%		309.0	304.0	306.5	312.5	302.5	300.5	301.0
EP		336.0	326.0	342.5	351.5	329.0	310.0	309.0
Cetane number		64.4	58.9	58.9	58.6	61.5	59.7	63.0
Arom. (wt. %, HPLC)								
Single-Ring		1.39	6.07	9.54	13.25	5.32	7.91	30.64
Double		0	11.43	22.47	31.06	0.81	8.07	0.32
Poly.		0	3.23	6.96	8.46	0.00	0.01	0.09
Total		1.39	20.73	38.97	52.77	6.13	15.98	31.05
Sulfur (wt. %)		20 (ppm)	0.15	0.28	0.40	1 (ppm)	0.10	11 (ppm)

(b) Test fuel properties (DS and CN Series)

Item	Sample	DS Series					CN Series					
		DS-1	DS-2	DS-3	DS-4	DS-5	CN-1	CN-2	CN-3	CN-4	CN-5	CN-6
Density @15°C		0.8065	0.8106	0.8142	0.8163	0.8313	0.8313	←	←	0.8187	←	←
Distillation (°C)												
IBP		147.5	159.0	157.5	158.0	154.5	154.5	←	←	185.5	←	←
50%		211.5	233.0	233.0	250.0	278.0	278.0	←	←	236.0	←	←
90%		248.0	254.0	273.0	304.0	338.0	338.0	←	←	272.0	←	←
EP		268.0	279.5	295.5	319.5	376.5	376.5	←	←	310.5	←	←
Cetane number		51.7	53.5	53.3	53.7	52.1	52.1	63.5	67.0	48.8	58.5	64.5
Arom. (wt. %, HPLC)												
Single-Ring		23.0	21.6	23.3	20.4	20.6	20.6	←	←	19.3	←	←
Double		1.83	2.59	2.55	2.55	3.30	3.30	←	←	6.37	←	←
Poly.		0.02	0.06	0.17	0.56	1.54	1.54	←	←	0.24	←	←
Total		24.7	24.3	26.0	23.5	25.4	25.4	←	←	25.9	←	←
Sulfur (wt. %)		0.01	0.12	0.03	0.06	0.17	0.17	←	←	0.42	←	←

タン価の影響を調べるために軽質軽油基材または重質軽油基材にナイトレート系セタン価向上剤を添加して、セタン価を49から67また変化させた。本シリーズにおいてはセタン価を添加剤によって変化させたので芳香族や分留性状等の性状は同一に保たれている。

また、軽油組成がPAHの排出に及ぼす影響を検討するために、表2に示す供試燃料を調整した。供試燃料ID-1~ID-5は、脂肪族系溶剤(沸点220~275°C、芳香族0%)に分解系軽油基材(芳香族82%)を混合し、芳香族を3~35%まで変化させた。さらに、芳香族を全く含まない供試燃料NON-Aは市販軽油からフルフラールを用いて芳香族を抽出して調製した。

2・2 供試エンジン 試験に用いた1991年型市販直噴無過給ディーゼルエンジン諸元を表3に示す。

また、D13モードによって供試エンジンからの排出物を測定したが、1989年排出ガス規制値以下であり供試エンジンは十分に整備された状態であった。

さらに、エンジンオイルがPMやPAHの排出に及ぼす影響を除くために、エンジンオイルとしては芳香族を全く含まない合成潤滑油(ポリ α -オレフィン)を用いた。

2・3 試験法 わが国のディーゼルエンジン用排

Table 2 Test fuel properties

Item	ID-1	ID-2	ID-3	ID-4	ID-5	NON-A
Density	0.7997	0.8251	0.8249	0.8302	0.8414	0.8020
Distillation (°C)						
IBP	215.5	186.5	168.0	172.5	159.5	253.0
50%	285.5	270.5	267.0	280.0	263.5	287.0
95%	311.5	325.5	350.0	345.0	345.0	320.5
EP	320.5	343.5	363.0	357.0	353.5	336.0
Cetane Number	59.0	50.2	54.0	53.1	57.9	64
Arom. (wt%, HPLC)						
Single-Ring	2.75	12.08	21.75	24.86	23.08	0
Double-Ring	0.38	2.24	3.11	1.86	10.57	0
Triple-Ring	0.00	0.26	0.32	0.78	1.36	0
Total	3.13	14.58	26.18	27.50	35.01	0
Sulfur (ppm)	3	359	1100	345	1600	650

Table 3 Engine specifications

Item	
Configuration	NA, DI
Cylinder Bore × Stroke (mm)	106×118
Displacement (cm ³)	6,014
Compression Ratio	19.2 : 1
Max. Torque (N. m)	412

Table 4 Analyzed polycyclic aromatic hydrocarbons

1. Naphthalene	5. Phenanthrene	9. Benzo(a)anthracene	13. Benzo(a)pyrene
2. Acenaphthylene	6. Anthracene	10. Chrysene	14. Dibenzo(a,h)anthracene
3. Acenaphthene	7. Fluoranthene	11. Benzo(b)fluoranthene	15. Benzo(ghi)perylene
4. Fluorene	8. Pyrene	12. Benzo(k)fluoranthene	16. Indeno(1,2,3-cd)pyrene

出ガス測定法であるD13モードに準拠してNO_x, CO, HC, PMを測定した。NO_xは化学発光検出器で、COは非分散型赤外線検出器で、HCは水素炎イオン検出器で、PMはミニダイリュージョントンネルを用いて測定した。また、排出物の測定精度を高めるために、試験は次のように同一日に供試燃料をベース燃料で挟み込んで測定し、排出物の評価はベース燃料との相対値として表示した。

試験順序：ベース燃料→ベース燃料→供試燃料→
供試燃料→ベース燃料

評価：相対値(%) = {(供試燃料の平均値 - ベース燃料の平均値) / ベース燃料の平均値} × 100

なお、エンジン最大出力は軽油性状の影響を受けるが、各供試燃料間で同一になるように燃料噴射量を調整した。

(2) PAHの測定 ダイリュージョントンネルシステムを用いてメンブランフィルタ上に捕集したPMをジクロロメタンを溶媒としたソックスレー抽出器で6時間抽出し、溶媒を窒素気流中で蒸発させて溶

剤可溶分(SOF)を得た。その後、PAH 分析上の妨害になる極性物質を除去するために、SOF をシリカゲルを充てんしたカラムに通してジクロロメタンで溶出した後にメタノールで5 ml に調製し、蛍光検出器付き高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を用いて、各 PAH を分析した。一方、分析対象とした表4に示した各 PAH の定量は、濃度が既知の PAH 標準試料を用いて作成した検量線に基づいて行った。なお、本測定法の妥当性を検討するために、表4に示した各 PAH を混合した標準試料を、本測定法に準拠して分析したが、各化合物の分離もよく十分な精度で PAH を定量できることがわかった。

3. 結果および考察

3.1 軽油性状と規制対象排出物との関係

(1) 組成の影響 図1~5に AM シリーズの供試燃料を用いて測定した排出物と組成の関係を示す。

組成が HC に及ぼす影響を示した図1によると、HC は芳香族が増すと直線的に増大している。一方、環状飽和化合物を28%含む供試燃料(Δ)も芳香族と HC との相関直線上にあるので、環状飽和化合物は飽和脂肪族と同等の HC 排出特性を示すと考えられる。また、二環以上の芳香族を含まない供試燃料($\circ$)からの HC は図1の相関直線よりも著しく低くなっている。さらに、三環以上の芳香族を含まない供試燃料($\square$)からの HC も相関直線より低くなっているため、多環芳香族ほど HC への影響が大きいと考えられる。

組成が CO に及ぼす影響を示した図2によると、HC に対する影響と同様に多環芳香族ほど CO への影響が大きくなっている。

組成が NO_x に及ぼす影響を示した図3によると、芳香族が増すと NO_x は直線的に増大している。これは、 NO_x が火炎温度に強く依存するので芳香族の火炎温度が高いためと推定される。

Fig.1 Effect of aromatics on HC emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

組成が PM に及ぼす影響を示した図4によると、PM は芳香族が増すと直線的に増大するが、多環芳香族を含まない供試燃料からの PM ($\circ$, $\square$)は芳香族が同一な他の供試燃料からの PM よりも少ないので、多環芳香族ほど PM への影響が大きいことを示している。また、図5に示すように SOF も芳香族が増すと直線的に増大しているため、芳香族の PM への影響はおもに SOF の増加によるもので浅見ら⁽⁵⁾や小林ら⁽⁶⁾の結果と一致している。

(2) 分留性状の影響 図6~9に90%留出温度

Fig.2 Effect of aromatics on CO emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig.3 Effect of aromatics on NO_x emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig.4 Effect of aromatics on PM emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 5 Effect of aromatics on SOF emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

が排出物に及ぼす影響を示すが、90%留出温度が低下するとHCとCOは増大し、 NO_x は低減している。軽油の軽質化はより多くの予混合気を形成し予混合燃焼を活発化する効果⁽¹⁷⁾とペネトレーションを低下させ⁽¹⁸⁾燃焼を悪化させる効果があると考えられる。したがって、本エンジンでは後者の効果が大きくHCとCOは増大し NO_x が低減したものと推定される。また、図9に示すように90%留出温度が高い重質燃料ほどPMは多くなっているが、これは重質燃料ほど多環芳香族が多いので多環芳香族の影響と考えられる。

(3) セタン価の影響 図10～13にセタン価が排出物に及ぼす影響を示す。セタン価が低下すると90%留出温度によらず、COは明らかに増大するが他の排出物への影響は極めて小さかった。わが国の1991年型無過給直噴エンジンを用いた下川ら⁽⁴⁾の実験によるとセタン指数が高くなると着火遅れが短縮し予混合燃焼割合が小さくなるのでPMは増加する傾向を示している。また、米国の1994年排出ガス規制に合格する直噴エンジンを用いたMcCarthyら⁽⁹⁾やUlmanら⁽¹²⁾の実験によるとセタン価が高くなると明らかにPMは低減している。したがって、セタン価の排出物に及ぼす影響はエンジン構造によって異なるが、その原因は明らかではない。また、セタン価の水準によらず90%留出温度の低いほうがHCとCOは多く NO_x は少なくなっているため、前述の90%留出温度と排出物の関係を検討した結果と一致している。

(4) 硫黄分の影響 図14に硫黄分とPMを構成しているサルフェートとの関係を示すが、硫黄分に比例してサルフェートが直線的に増大している。硫黄分が0.2 wt%の軽油からのPMに占めるサルフェートの割合は約6%であるが、硫黄分を0.05 wt%まで低減するとPMに占めるサルフェートの割合は約1%にまで低減する。したがって、現在のJIS規格である

Fig. 6 Effect of 90% distillation temperature on HC emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 7 Effect of 90% distillation temperature on CO emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 8 Effect of 90% distillation Temperature on NO_x emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 9 Effect of 90% distillation Temperature on PM emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 10 Effect of cetane number on HC emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 11 Effect of cetane number on CO emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 12 Effect of cetane number on NO_x emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 13 Effect of cetane number on PM emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

Fig. 14 Effect of sulfur content on sulfate emission from 1991 year model DI diesel engine (D-13 Mode)

硫黄分 0.2 wt% から硫黄分を 0.05 wt% まで深度脱硫すると PM は約 5% 低減するので硫黄分の低減は重要である。

(5) 統計解析 表 1 に示した全供試燃料を用いて軽油性状と排出物の関係を統計的に解析した。

軽油性状として重要な密度(Dens), セタン価(CN), 芳香族(Arom), 単環芳香族(S-Arom), 二環芳香族(D-Arom), 三環以上の芳香族(P-Arom), 90% 留温度(T90)と排出物として重要な NO_x および PM との関係を統計的に解析し, 式(1)および式(2)を得た。

$$\begin{aligned} \text{PM 増減率}(\%) = & 0.414(\text{S-Arom}) \\ & + 1.15(\text{D-Arom}) + 1.40(\text{P-Arom}) - 30.61 \\ (\text{寄与率 } r^2 = & 0.996) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_x \text{ 増減率}(\%) = & 0.267(\text{S-Arom}) \\ & + 0.484(\text{D-Arom}) + 0.36(\text{P-Arom}) - 9.68 \\ (r^2 = & 0.91) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

重回帰式(1)及び(2)によると近年の直噴エンジンからの NO_x と PM は芳香族に一義的に依存し, 他の性状であるセタン価や分留性状等の影響は極めて小さいことがわかった。また, 回帰式(1)において多環芳香族ほど回帰係数が大きいので, 軽油組成の PM への影響は次の順に大きいことがわかった。

3 環以上の芳香族 > 2 環芳香族 > 単環芳香族 > 飽和化合物

したがって, PM は燃料の噴射開始から着火に至るまでの過程に影響する軽油の物理性状やセタン価よりも, 燃焼反応に影響する軽油の分子構造に強く依存するものと推定される。

一方, 回帰式(2)においては各回帰係数間の有意差

Fig. 15 Typical HPLC chromatogram

はないので、 NO_x は分子構造よりも火炎温度に影響する芳香族総量に強く依存するもの推定される。

3・2 軽油性状と PAH の排出との関係 供試燃料 ID-3 (基準供試燃料) からの PAH の分析例を図 15 に示すが、各 PAH の分離は十分であると判断される。また、ID-3 からの PM 中に占める PAH 濃度は 40 ppb 程度であり、PAH 排出量は極めて微量であることが確認された。

分析対象とした各 PAH の総量を ID-3 を基準供試燃料とした相対値で図 16 に示すが、PAH は軽油中の芳香族総量や多環芳香族に強く依存している。PAH は、軽油中の PAH が燃焼過程で消費されずに排出される機構と燃焼反応過程で生成する機構が考えられている^{(19)~(21)}。前者の機構では、PAH は軽油中の多環芳香族に一義的に依存すると考えられる。また、後者の機構でも脂肪族よりも芳香族のほうが本質的に PAH を生成しやすいので組成の影響を強く受けると推定される。

したがって、PAH の生成機構を問わず、PAH は軽油中の多環芳香族に強く依存すると考えられるので、図 16 に示す PAH 排出傾向は妥当である。

一方、PAH が燃焼反応過程で生成するかどうかを確認するために、芳香族を全く含まない供試燃料 NON-A からの PAH を分析した。NON-A からの PAH 分析結果を ID-3 からの PAH 分析結果との比較で図 15 に示すが、PAH はほとんど検出されていない。軽油、エンジンオイルともに芳香族を含んでいない系からは PAH がほとんど検出されないため、PAH は軽油中の多環芳香族が燃焼過程で消費されずに排出される機構が支配的であると推定される。また、図 16 に PM の測定結果をも示すが、前述の結果と同様に芳香族または多環芳香族が増すと PM も増大しており、PAH の排出傾向と一致している。

Sample	Arom (%)		Relative Change in PAH Emission (%)				Relative Change in PM Emission (%)		
	Total	Triple Ring	-40	-20	0	+20	-20	0	+20
ID-1	3.1	0							
-2	14.6	0.26							
-3	26.2	0.32							
-4	27.5	0.78							
-5	35.0	1.36							

• Relative Change in Emission (%) = $[(\text{Emission from Sample}) - (\text{Emission from ID-3})] / (\text{Emission from ID-3}) \times 100$

• PAH Emission (%) = Sum of PAHs shown in Table 4

Fig. 16 Effect of aromatics in fuel on PAH and PM emissions

4. ま と め

市販多気筒直噴ディーゼルエンジンを用いて軽油性状が排出物に及ぼす影響を検討した結果、以下のことがわかった。

(1) 排出物として重要な PM と NO_x には芳香族が最も支配的な要因で、次式によって精度よく推定できる。

$$\begin{aligned} \text{PM 増減率}(\%) &= 0.414(\text{S-Arom}) \\ &+ 1.15(\text{D-Arom}) + 1.40(\text{P-Arom}) - 30.61 \\ (\text{寄与率 } r^2 &= 0.996) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_x \text{ 増減率}(\%) &= 0.267(\text{S-Arom}) \\ &+ 0.484(\text{D-Arom}) + 0.36(\text{P-Arom}) - 9.68 \\ (r_2 &= 0.91) \end{aligned}$$

S-Arom: 単環芳香族

D-Arom: 二環芳香族

P-Arom: 三環以上の芳香族

(2) 芳香族の増加による PM の増大は、おもに SOF の増大によるものである。

(3) セタン価が高くなると CO は低減するが、他の排出物への影響は極めて小さい。

(4) 90% 留出温度が低下すると PM は低減するが、これは 90% 留出温度の低下によって多環芳香族が除去されたためと推定される。

(5) 軽油中の硫黄分を低減するとサルフェートが減少するので、PM は低減する。硫黄分を現行の JIS 規格である 0.2 wt% から 0.05 wt% まで低減すると、PM に占めるサルフェートの割合は約 6% から約 1% まで減少する。

(6) PAH はシリカゲルを充てんしたカートリッジカラムに SOF を通して極性物質を除去した後に、蛍光検出器付き高速液体クロマトグラフィーによって定量できる。

(7) PAH は軽油中の多環芳香族が多いほど増大し、PM の傾向と一致している。また、芳香族を含まない軽油は PAH をほとんど排出しないので、PAH

は軽油中の多環芳香族が原因となる機構が支配的である。

文 献

- (1) 環境庁, 環境白書(1994年度版).
- (2) Kobayashi, S., Nakajima, T. and Hori, M., Effect of Fuel Properties on Diesel Exhaust Emissions, *SAE Paper*, No. 945121 (1995).
- (3) Tsurutani, K., Fujimoto, Y. and Kumamoto, M., The Effects of Fuel Properties and Oxygenates on Diesel Exhaust Emissions, *SAE Paper*, No. 952349 (1994).
- (4) 下川清広・下田正敏・上光薫, 燃料性状がディーゼルエンジンの性能, 排出ガスに及ぼす影響, 自動車技術, 第47, 5号, (1993), 55-60.
- (5) 浅海靖男・新谷元広・渡邊慶人, 大型トラックディーゼルエンジンの排出ガスに及ぼす燃料性状の影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, 924 (1992).
- (6) 小林伸治・中島徹, 堀政彦, ディーゼル排気物質に及ぼす軽油性状の影響, 自動車研究, 第13, 12号, (1991), 449-452.
- (7) Arai, M., Impact of Changes in Fuel Properties and Lubrication Oil on Particulate Emissions and SOF, *SAE Paper*, No. 920556 (1992).
- (8) Fukuda, M., Tree, D. R., "Foster, D. E. and Suhre, B. R., The Effect of Fuel Aromatic Structure and Content on Direct Injection Diesel Engine Particulates, *SAE Paper*, No. 920110 (1992).
- (9) McCarthy, C. J., Slososake, W. J., Sienicki, I. E. and Jass, R. E., Diesel Fuel Property Effects on Exhaust Emissions from a Heavy Duty Diesel Engine that Meets 1994 Emissions Requirements, *SAE Paper*, No. 922267 (1992).
- (10) Lange, W. W., The Effect of Fuel Properties on Particulates Emissions in Heavy-Duty Truck Engines Under Transient Operating Conditions, *SAE Paper*, No. 912425 (1991).
- (11) Van Deckhoven, L. C., Effects of Fuel Properties on Diesel Engine Emissions-A Review of Information Available to the EEC-MVEG Group, *SAE Paper*, No. 910608 (1991).
- (12) Ullman, T., Mason, R. L. and Montalvo, D., Effects of Fuel Aromatics, Cetane Number, and Cetane Improver on Emissions from a Prototype 1991 Diesel Engine, *SAE Paper*, No. 902171 (1990).
- (13) Sienicki, E. J., Jass, R. E., Slodowske, W. J., McCarthy, C. I. and Krodel, A. L., Diesel Fuel Aromatic and Cetane Number Effects on Combustion and Emissions from a Prototype 1991 Diesel Engine, *SAE Paper*, No. 902172 (1990).
- (14) Flanigan, C. T., Litzinger, T. A. and Craves, R. L., The Effect of Aromatics and Cycloparaffins on DI Diesel Emissions, *SAE Paper*, No. 892130 (1989).
- (15) Abbass, M. K., Andrews, G. E., Williams, P. T. and Bartle, K. D., The Influence of Diesel Fuel Composition on Particulate PAH Emissions, *SAE Paper*, No. 892079 (1989).
- (16) Ullman, T., Investigation of the Effects of Fuel Composition on Heavy-Duty Diesel Engine Emissions, *SAE Paper*, No. 892072 (1989).
- (17) Anderton, D. and Waters, P. E., Effect of Fuel Composition on Diesel Engine Noise and Performance, *SAE Paper*, No. 820235 (1982).
- (18) Arai, M., Tabata, M., Hiroyasu, H. and Shimizu, M., Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle, *SAE Paper*, No. 840275 (1984).
- (19) Abbass, M. K., Andrews, G. E., Williams, P. T. and Bartle, K. D., The Influence of Diesel Fuel Composition on Particulate PAH Emissions, *SAE Paper*, No. 892079 (1989).
- (20) Williams, P. T., Andrews, G. E. and Bartle, K. D., Diesel Particulate Emissions: The Role of Unburnt Fuel in the Organic Fraction Composition, *SAE Paper*, No. 870554 (1987).
- (21) Williams, P. T., Bartle, K. D. and Andrews, G. E., *The Relation between Polycyclic Aromatic Compounds in Diesel Fuels and Exhaust Particulates*, Fuel 65, 1150 (1986).