

燃料設計によるディーゼル機関の高効率化、 低公害化に関する研究（第3報）

- 混合燃料の組成がディーゼル機関の排出ガスに及ぼす影響 -

環境エネルギー部

鈴木 央一
石井 素

Rahman Montajir 河合 英直
後藤 雄一

1. まえがき

ディーゼル機関の排出ガスは依然として社会的に大きな問題であるが、これまでに大幅な低減がなされてきている。それを実現してきたのは、噴射系を中心とした要素技術、およびそれに伴う燃焼制御技術の進歩によるところが大きい。しかしながら、燃焼制御技術のみでは今後要求される排出ガスレベルを達成することは困難であり、燃料や後処理を含めた系全体での議論が必要になっている。

燃料が排出ガス挙動に及ぼす影響については報告例¹⁾はあるものの、どの要素がどれだけ排出ガスに影響を与えるかは必ずしも明確でない。その原因としては、パラメータが極めて多岐にわたること、他を変えずに一つの要素だけを変化させることが困難なこと、複数の成分を混合した場合、必ずしも両者の中間の性状となるとは限らないこと、などである。

既報において、n-ノナン（C₉H₂₀）と、それと同等のセタン価になるようにした n-ペンタン（C₅H₁₂）・n-トリデカン（C₁₃H₂₈）混合燃料では、後者のほうが T₉₀ が高いにもかかわらず、粒子状物質（PM）低減が可能であることを示してきた^{2) 3)}。しかしながら、T₅₀ で見ると後者のほうが低く、PM 低減要因が全体の沸点なのか、混合成分の沸点差やセタン価の差なのか明白でない面もあった。

そこで本報告では2成分混合燃料を前提に、同等沸点ながら、構成する成分の沸点やセタン価が異なる場合と、沸点が異なる場合の燃焼および排出ガスを比較し、それらの要素の影響を実験的に把握することを試みた。とくに構成成分の違いについては、通常ではまず見られない低沸点高セタン価成分と高沸点低セタン価成分の混合した燃料についても試作して比較を行った。

表1 エンジン諸元

Type	4 cycle, single cylinder
Combustion Chamber	Direct injection
Bore x Stroke mm	135.0 x 150.0
Displacement L	2.147
Compression Ratio	16.0
Maximum Power kW	25 / 2000 rpm
Swirl Ratio	2.2
Injection system	Common rail
Nozzle Spec. mm x #	0.26 x 6

表2 燃料構成成分の諸元

名称	iso-Octane	n-Octane	n-Nonane	n-Decane	Special 1	Special 2	Special 3
分子式	C ₈ H ₁₈	C ₈ H ₁₈	C ₉ H ₂₀	C ₁₀ H ₂₂	-	-	-
密度 kg/L	0.692	0.703	0.718	0.730	0.770	0.764	0.791
沸点 K	372	399	424	447	-	-	-
蒸留温度 K							
T10					526	452	494
T50					528	457	507
T90					533	462	523
セタン価	10	49	59	72	95	27	28
成分割合 %							
直鎖炭化水素	0	100	100	100	100	-	-
飽和炭化水素	100	100	100	100	100	98.9	99.9
芳香族	0	0	0	0	0	1.1	0.1
硫黄	0	0	0	0	0	0	0

2. 実験装置および実験条件

2. 1. 実験装置および燃料性状

供試機関は直接噴射式単気筒ディーゼル機関でコモンレール式噴射ポンプを装着している。その諸元を表1に示す。供試燃料には表2に示す性状の成分を混合した燃料 A～F の6種類を用いた。表2中「special」とあるのは、蒸留性状やセタン価をある範囲に調製した特殊燃料である。燃料 A～F の諸元を表3に示す。いずれも二種類の成分を混合したもので、セタン価をそろえている。燃料 A～C は沸点が同等だが、構成する成分の沸点とセタン価を変化させたもので、燃料 A は低沸点低セタン価成分と高沸点高セタン価成分を組み合わせたもので、燃料 B では逆に低沸点成分のセタン価が高く高沸点分のセタン価が低い。また燃料 C では沸点が同等でセタン価のみ異なるものを混合している。燃料 D～F では、セタン価を合わせつつ平均沸点が異なるように適当

表3 供試燃料諸元

名称	Fuel A	Fuel B	Fuel C	Fuel D	Fuel E	Fuel F
成分1	iso-Octane	n-Nonane	n-Decane	n-Octane	iso-Octane	Special 2
成分2	Special 1	Special 3	Special 2	n-Nonane	n-Decane	Special 1
体積混合割合(成分1:成分2)	1:1	3:1	3:2	2:1	2:5	5:3
セタン価 (注1)	53	55	54	53	55	52
密度 kg/L	0.731	0.736	0.743	0.711	0.719	0.766
平均沸点 (注2)	450	445	451	411	426	484
二成分の沸点(or T50)差	156	83	10	25	73	71

注1)セタン価は着火試験器FIA-100で測定。燃料Cについては各成分の混合比より計算した。

注2)平均沸点については本文参照

なものを組み合わせた。各燃料における二成分の沸点あるいは T50 の、混合比で加重平均した値を「平均沸点」と呼ぶ。ここで述べた各燃料における構成成分の沸点（特殊燃料については T50）とセタン価の関係を図表化すると図2のようになる。

排出ガス測定について、CO、CO₂にはNDIR、NO_xにはCLD、THCにはHFID（ともに堀場製作所MEXA-7100D）を用いた。PMの測定はダイリレーショントンネルを用いて、30分間定常運転し、全量希釈を行いフィルタに捕集した。燃焼解析には、ピエゾ式圧力変換器により気筒内圧力を測定し、連続した20サイクルの平均値を用いた。

2.2. 実験条件

実験は機関回転速度 1,000rpm の定常運転状態で行った。エンジン負荷率は 50%相当のトルクで一定とした。そのときの空気過剰率λは約 2.6 である。噴射圧力はコモンレール圧力により設定し、35、50、75 および 100MPa とした。燃料噴射開始時期（以下、噴射時期という）は、50%負荷時に各噴射圧力で最高燃費率となる値とし、噴射圧力の低い条件からそれぞれ 10、8、5、3deg.BTDC とした。

3. 実験結果および考察

各燃料において、噴射圧力を変化させた場合の NO_x と PM のトレードオフ関係を図3に示す。この図からは、燃料の違いによる差は予想以上に小さい。燃料による排出傾向を調べるために回帰式を求めたところ、指数関数

$$y = A e^{Bx} \quad (y: \text{PM 量}, x: \text{NO}_x \text{ 濃度})$$

の形で、いずれの燃料においても相関係数 0.96 以上の相関をもって表された。この図での NO_x と PM のトレードオフは、噴射圧力を変化させることによるものである。したがって、上式は噴射圧力を上昇

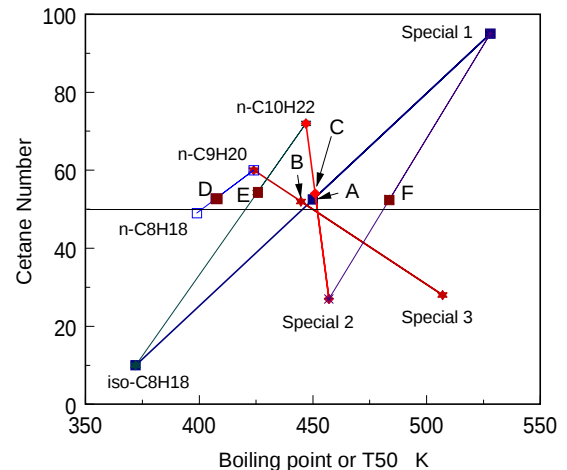


図2 各供試燃料構成成分の沸点とセタン価の関係

させた場合の噴霧微粒化向上による拡散促進効果、および噴射期間が短縮化することによる初期燃焼の活発化が NO_x および PM 排出に及ぼす影響を関係づけたものといえることができる。この式の定数 A、B と各燃料の平均沸点との関係を示したのが図4である。この図から定数 A、B とともに平均沸点と強い相関を持つ一方で、沸点同等ながら構成内容の異なる燃料 A～C の違いは比較的小さい。低沸点成分のセ

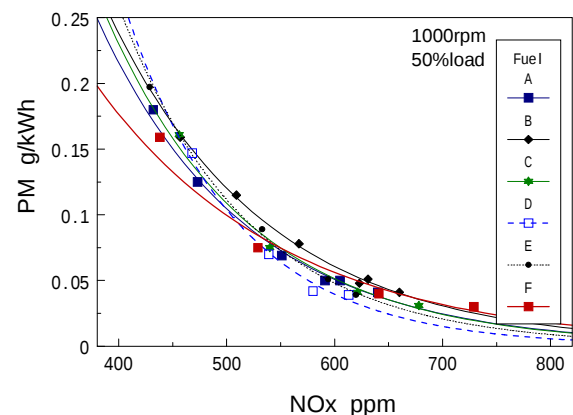


図3 各燃料使用時の噴射圧力による NO_x - PM トレードオフ関係

タン価の低い燃料 A のほうがそれとは逆の燃料 B よりも着火前の拡散効果があると考えられたが、図 4 の A、B で示される PM 排出傾向を見る限り、そのような効果があったとはいえない。図 4 では沸点が低い燃料ほど A の値が大きく、B の値が小さい。このことは NO_x が低い場合には PM が他よりも高くなるのに対して、NO_x 排出が増加するとより大きな傾きで PM が低減することを意味しており、沸点の低い燃料ほど噴射圧力上昇による PM 低減効果が大きいとを示している。

同一運転条件における燃料の違いによる NO_x 排出濃度の差は小さいが、その影響は無視できない。そこで、各燃料における PM を比較するにあたり、より公平な形とするため、式を用いて一定 NO_x 値における PM 排出量を計算し、NO_x 排出量の影響をなくした。そのようにして各燃料の平均沸点と密度に対する PM 排出量を比較したのが図 5 である。この図を見ると、NO_x500ppm では、平均沸点、密度に対する PM 排出量の明確な傾向は見られない。それに対して NO_x700ppm では平均沸点および密度の上昇に伴い PM 排出量も明らかに増加する傾向が見られた。このことから噴射圧力の高い条件では平均沸点あるいは密度が PM 生成に影響を及ぼすことがわかる。ここで平均沸点と密度の関係が問題になる。沸点は一分子あたりの炭素数が少ないもので低く、多いものでは高い傾向がある。一方、炭素と水素のみから構成される炭化水素では、C/H 比によって密度はほぼ決定される。今回用いた燃料はすべて飽和炭化水素であり、一分子あたりの炭素数により C/H 比は一意的値となるので、沸点と密度は互いに従属関係にある。もっとも、密度や沸点は分子構造にもより、例えばイソオクタンは n-オクタンより密度も沸点も小幅ながら小さい値となる。したがって、図 5 の 2 つのグラフで相関係数に差がある場合には高い方のパラメータに依存する度合いが大きいと考えられるが、有意な差はなかった。

図 5 の NO_x700ppm における各燃料の PM 排出では、ほとんどのプロットが線上に位置し、高い相関を示しているが、1 点明らかに外れている点がある。これは燃料 B におけるものであり、燃料 B の特性による可能性もある。これについては後述する。

図 6 に各燃料における THC 排出濃度を示す。THC 排出濃度は、平均沸点の異なる D、E、F で沸点の高

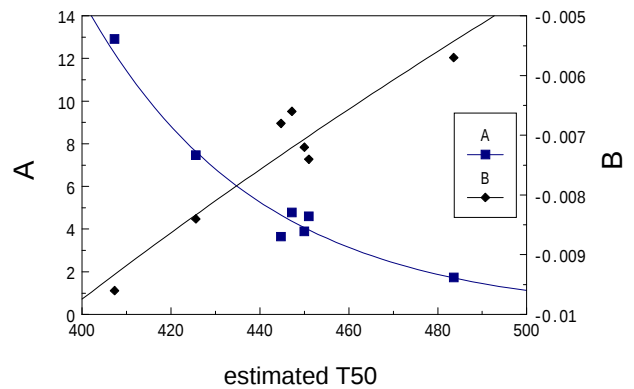


図 4 各燃料の平均沸点に対する NO_x - PM トレードオフ関係を表す式の定数項 A、B の関係

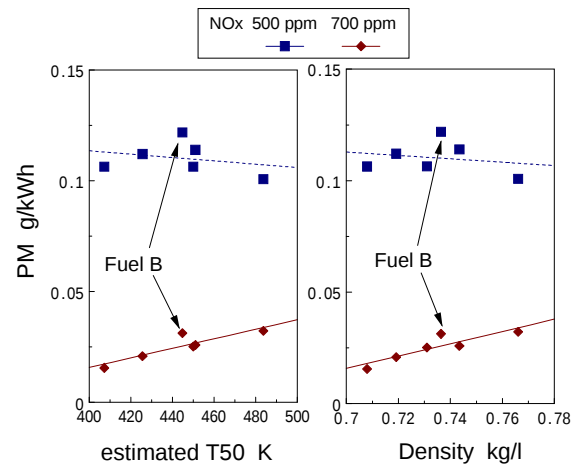


図 5 燃料の平均沸点および密度に対する NO_x 一定に修正した PM 排出量

いものほど低くなっており、その影響も存在すると考えられるが、平均沸点が同等の燃料 A、B、C でも大きく異なることから、平均沸点のみと関係があるとはいえない。ここで THC 排出の低かった燃料は C と F である。この 2 燃料は平均沸点は異なるものの、他の燃料よりも低沸点成分の沸点が高い点で共通している。沸点の低い成分は蒸発しやすいために、かえってより多くトップクリアランス部に入ったりするなどして、燃焼することなく排出されるものと考えられる。このことから、燃料組成の違いは全体として同等といえるものでも蒸発過程における違いは存在し、排出ガス性能にも影響を及ぼすといえる。

PM 排出に及ぼす燃料組成の影響をさらに調べるため、ソックスレー法により SOF を抽出し、SOF 排出量の比較を行った。噴射圧力 50MPa および 100MPa における各燃料を用いた場合の SOF 排出量を示したのが図 6 である。PM の絶対排出量は噴射圧力により異なるが、SOF 排出量は噴射圧力による

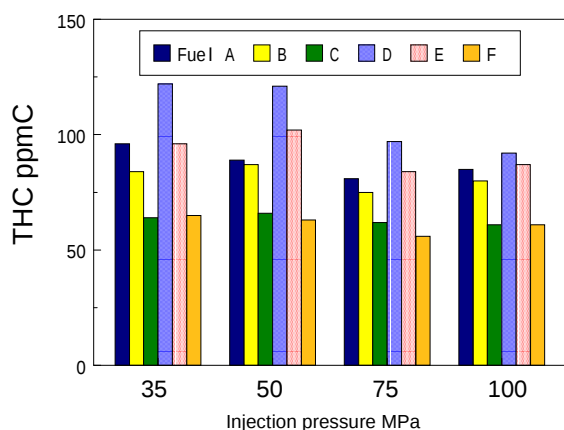


図6 各燃料における THC 排出濃度比較

違いは小さい。ただし、燃料 C のみ噴射圧力により大きく異なる結果になった。この図より燃料 B および D で SOF 排出が多く、燃料 E で少ないといえる。平均沸点でみると燃料 E は燃料 B、D の中間であり、平均沸点からではこの傾向を説明できない。SOF の多かった燃料 B、D、およびばらつきの大きかった燃料 C を除くと燃料 A、E、F が残る。この3燃料が他の3燃料と異なる点は、低沸点低セタン - 高沸点高セタン成分の組み合わせである点である。この組み合わせでは蒸発過程で先に蒸発する低沸点成分が着火せずに高沸点成分を拡散し、また、貫徹力のある高沸点成分がピストンに付着してもセタン価が高いので燃焼しやすいためと考えられる。この燃料 A、E、F の3者では、高沸点成分の沸点の低い燃料 E で SOF 排出が低く、他の2つは高沸点成分が同じであるため同等になったとみられる。一方、燃料 B では高沸点成分のセタン価が低いため、ピストンに付着した燃料が燃焼しにくくなり、SOF 排出につながった。燃料 D は高沸点成分の沸点が低く、低沸点成分でもセタン価は割と高く SOF 生成には有利と思われたが結果は高くなった。要因として、2燃料の沸点やセタン価の差が小さいことの他、燃料 D がノルマルパラフィンのみで構成されていることがあげられる。炭化水素は燃焼以前に高温高圧場で炭素数の少ない炭化水素に分裂するが、イソパラフィンではそれが起きやすいのに対してノルマルパラフィンではそれが起きにくい。そのためイソパラフィンの含まれる燃料では、より高い割合の未燃分が分解した炭化水素として排出され、SOF として捕集されない結果になったものと考えられる。

図5において、燃料 B において傾向線よりも PM

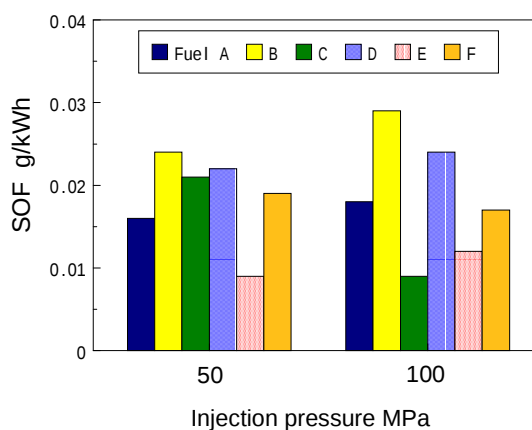


図7 各燃料における SOF 排出量比較

が高い値となったことを既述したが、燃料 A、B における ISO_F (PM 中から SOF を除いたもの) の量はほとんど変わらず、SOF の差が全体の差になった形になっている。PM 全体量には平均沸点の影響が支配的だったが、SOF 比率の高い条件では燃料組成の影響が大きくなることが予想される。

4. ま と め

燃料の蒸発性等が燃焼および排出ガスに及ぼす影響を調べるため、平均沸点は同等で構成成分の沸点、セタン価の違う3燃料と、平均沸点の異なる3燃料の計6つを用いて比較を行った。

(1) NO_x と PM のトレードオフ関係でみた排出ガスパフォーマンスには、燃料の平均沸点あるいは密度の影響が大きく、それ以外の要因による影響は小さい。平均沸点と密度については互いに従属関係にあるため、どちらの影響が強いかは判断できなかった。

(2) しかし、THC および SOF 排出には燃料組成の影響がみられた。THC は沸点の低い成分が存在すると増加する。SOF は低沸点低セタン - 高沸点高セタン成分の組み合わせ、あるいはイソパラフィンの存在で低くなると予測された。

おわりに

本実験を行うにあたり、燃料供給面で協力を頂いた新日本石油株式会社柴田元氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) JCAP ディーゼル車 WG、JCAP 技術報告書 1-3-1, 2000
- 2) 鈴木ほか、自動車技術会論文集 Vol. 33 No. 2, p25-30, 2002
- 3) 鈴木ほか、自動車技術会講演前刷集 No. 73-01, p11-14, 2001