

# 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

- 混合燃料を用いた予混合圧縮着火機関の燃焼・排気特性 -

川野 大輔\* 鈴木 央一\* 石井 素\*  
堀 重雄\* 後藤 雄一\* 小高 松男\*

## Study on High Efficiency and Low Emission Diesel Engine Using Fuel Design

- Combustion and Emission Characteristics of Homogeneous Charge  
Compression Ignition Engine Using Blended Fuels -

by

Daisuke Kawano\* Hisakazu Suzuki\* Hajime Ishii\*  
Shigeo Hori\* Yuichi Goto\* Matsuo Odaka\*

### Abstract

Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) is effective for the simultaneous reduction of soot and NOx emissions from diesel engine. In general, high octane number and volatile fuels (gasoline components or gaseous fuels) are used for HCCI operation, because very lean mixture must be formed during ignition delay of the fuel. However, it is necessary to improve fuel injection systems, when these fuels are used in diesel engine.

The purpose of the present study is the achievement of HCCI combustion in DI diesel engine without the large-scale modification of engine components. Various high octane number fuels were mixed with diesel fuel, and the mixed fuels were directly applied to DI diesel engine. The cylinder pressure and heat release rate of each mixed fuel were analyzed. The ignition delays of HCCI operations decreased with an increase in the operation load, although that of conventional diesel operation did not almost varied. In addition, the mixed fuel containing much higher volatility fuel produced the higher peak of heat release rate of premixed combustion. The exhaust emissions (CO, CO<sub>2</sub>, THC, NOx, PM) in case of each mixed fuel were measured. Although THC and CO emissions at HCCI operations were higher than those from conventional diesel combustion, lower NOx emission could be achieved by HCCI operations using the mixed fuels in spite of low volatility of base fuel. PM emission was relatively high in case of HCCI operations, because SOF emission derived from the base fuel in the mixed fuels was high. The results of numerical simulation using KIVA3V in which multicomponent fuel spray model was incorporated, verified that the above experimental results were closely related with the mixture formation in combustion chamber.

---

原稿受付：平成 17 年 1 月 19 日

\* 環境研究領域

## 1. まえがき

ディーゼル機関はガソリン機関に比べて燃費や耐久性に優れていることから、長距離輸送に用いるトラックを中心に広く利用されているが、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や粒子状物質 (PM) は大気汚染の大きな一因である。そのためディーゼル機関に対する排気ガス規制が年々強化されており、日本では 2005 年から施行される新長期規制に続き、ポスト新長期規制の策定にも乗り出している。しかし、従来のディーゼル機関の延長上でこれらの規制を達成するのは困難であり、超低エミッションをなし得る画期的な技術が求められている。

燃焼面から超低エミッションを実現する方法の一つとして、予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) 燃焼が提案されている<sup>1)</sup>。HCCI は燃焼室内に希薄予混合気を形成させ、それを自己着火させる燃焼法であり、スパークプラグにて着火させるガソリン機関や、燃料噴射中に自己着火を伴うディーゼル機関とは異なる燃焼法である。希薄予混合気の低温燃焼が実現できるため、NO<sub>x</sub>、PM がほとんど排出されない。しかし、着火時期の制御、ノッキングによる運転範囲の制限、THC、CO の多量排出などが課題として挙げられ、近年 HCCI の実機関適用に向けた様々な研究開発が進められている。

HCCI の供試燃料として、ガソリン系成分やガス燃料のように、軽油とは大幅に組成の異なる高オクタン価・高揮発燃料が多くの研究で用いられている<sup>2-3)</sup>。これは、軽油系成分では揮発性が低く予混合気を生成しにくいのに加えて、セタン価が高く過早着火が生じるためである。しかし、既存の直接噴射式ディーゼル機関に高オクタン価・高揮発燃料を適用するには、燃料噴射ポンプやノズルの改良のほか、吸気管に気化器やインジェクタを装着する等の、燃料噴射系を複雑にする改造が必要となる<sup>3-4)</sup>。

そこで本研究では、既存の直接噴射式ディーゼル機関に HCCI を適用するため、機関の改造は最小限に抑え、燃料面からのアプローチにより HCCI 燃焼を実現した。上記のように軽油では過早着火が生じるが、軽油に高オクタン価成分を混合し、燃料のセタン価を下げることでこれを防止した。その際、揮発性が異なる数種の高オクタン価成分を混合し、揮発性が与える HCCI の燃焼および排気特性への影響を解析した。この結果から、特に HCCI で多量に排出される未燃成分に着目し、軽油をベース燃料とした混合燃料の、HCCI に対する適応性を検証した。

## 2. 実験装置および方法

本実験で使用したエンジンの画像およびその主要諸元をそれぞれ図 1、表 1 に示す。このエンジンは、コモンレール直噴式の 4 サイクル水冷単気筒ディーゼル機関である。実験装置の概略図を図 2 に示す。排気ガス測定では、CO、および CO<sub>2</sub> に NDIR、NO<sub>x</sub> に CLD、THC には FID (ともに堀場製作所: MEXA-7100) を用いた。PM は希釈トンネルを用いて、15 分間の定常運転の後、フィルタに捕集された。捕集された PM は、高速溶媒抽出法 (ASE 法) を用いて、可溶成分 (SOF) と不可溶成分 (ISOF) に分



Fig. 1 Photograph of test engine

Table 1 Engine specifications

Engine type	Single cylinder diesel engine
Chamber shape	Troidal
Injection system	Common rail
Bore x stroke	135.0 x 150.0 mm
Displacement	2.15 L
Compression ratio	16
Swirl ratio	2.2

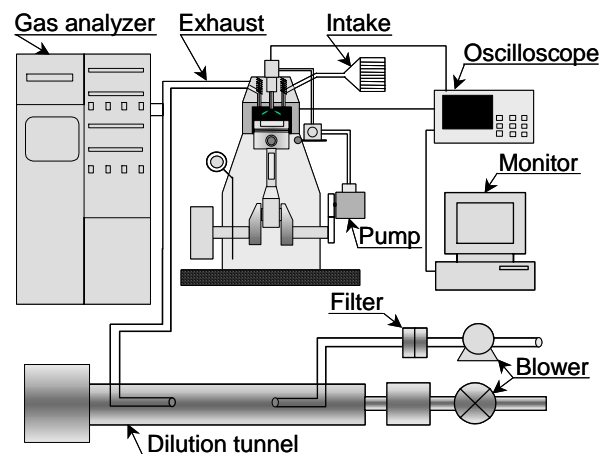


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

離された。また、燃焼室内に圧力センサーを挿入し、連続 20 サイクル平均の筒内圧データを、熱発生率の算出に使用した。

### 3. 実験条件

実験条件を表 2 に示す。本実験では、機関回転速度 1000 rpm、噴射圧 100 MPa で一定とした。HCCI 燃焼の際には噴射時期をすべての条件で -60 deg.ATDC に設定したが、この早期噴射によるシリンダ壁面への燃料付着を低減するため、従来のノズルより噴射角を狭角とした噴射角 60° のノズルを使用した。また、排気ガス再循環 (EGR) は HCCI において有効な燃焼制御手法であり<sup>5-6)</sup>、本実験システムにおいても EGR は可能であるが、本実験では EGR は行わず、燃料性状の相違に主眼を置いた考察に留める。

供試燃料の物性値を表 3 に示す。ベース燃料には硫黄分約 10 ppm の軽油を用いた。添加する炭化水素燃料には、イソパラフィン系のイソオクタン、芳香族系のトルエン、含酸素系の MTBE に加えて、イソパラフィン系の高沸点成分のみを混合した多成分燃料 (iso-paraffins) を使用した。表 3 の混合割合の値は、単位体積のベース軽油に対する各燃料の体積割

Table 2 Test conditions

Engine speed	1000 rpm
Nozzle orifice diameter	0.26 mm
Number of nozzle orifice	6
Injection pressure	100 MPa
Injection timing	-60 deg.ATDC (HCCI)
	-13.5 deg.ATDC (conv.)
EGR ratio	0.0
Water temperature	348 K

合を示している。この混合割合は、IMEP が 0.35 MPa の際に上死点付近で着火が生じるように、予備実験であらかじめ決定されたものである。それぞれの燃料でオクタン価が異なるため、混合割合も様々であるが、トルエンと MTBE に関しては双方ともオクタン価が 120 程度であるため、同じ混合割合で着火遅れもほぼ同等となった。また、それぞれの燃料を軽油に添加した際の平均沸点を表 3 の最下段に示す。高オクタン価成分の中で最も低揮発のイソパラフィン系添加の場合で最も平均沸点が高く、一方高オクタン価成分が高揮発で、その混合割合も高いイソオクタン添加で平均沸点が最も低い。

### 4. 混合燃料噴霧モデル

内燃機関の噴霧燃焼に関するシミュレーションによく使用されている KIVA3V<sup>7)</sup>を用い、燃焼室内における混合気形成過程の数値解析も、実験と合わせて行われた。しかし、オリジナルの KIVA3V では多成分燃料の計算が不可能であるため、以前構築した混合燃料噴霧モデル<sup>8)</sup>を使用した。本モデルの概要を以下に示すが、詳細は参考文献 8)を参照されたい。

#### 4.1. 多成分燃料の物性値推算

KIVA3V オリジナルコードでは、燃料の物性値は温度別に与えられているものの、圧力の依存性は考慮されていない。そこで、各温度・圧力における炭化水素の物性値推算が可能である NIST Thermo-physical Properties of Hydrocarbon Mixture Database (SUPERTRAPP)<sup>9)</sup>のソースプログラムを KIVA3V に組み込み、多成分燃料の物性値の圧力・温度依存性を考慮した。また、多成分燃料の場合には各成分の蒸発により液滴内の温度や混合割合が時々刻々変化するため、各計算ステップで各パーセルの物性値を更新させた。

Table 3 Properties of test fuels

		Diesel fuel	Iso-octane	Iso-paraffins	Toluene	MTBE
Formula	[-]	-	C8H18	-	C7H8	C5H12O
Boiling point (T <sub>50</sub> )	[K]	(550)	372	(507)	384	328
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	811	692	792	882	774
Viscosity	[mm <sup>2</sup> /s]	3.841	0.680	2.968	0.626	0.452
Heating value	[MJ/kg]	46.60	44.35	44.03	40.53	34.90
CN (RON)	[-]	55.6	(100)	28.0	(120)	(117)
H/C	[-]	1.99	2.25	2.09	1.14	2.40
Sulfur content	[ppm]	10	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Mixing ratio	[-]	1.0	2.0	6.0	0.6	0.6
Averaged b.p.	[K]	550	431.3	513.1	487.8	466.8

#### 4.2. 多成分燃料の蒸発過程のモデリング

オリジナルコードでは燃料を理想流体と仮定し、ラウールの法則により液滴表面における気液平衡を計算している。本モデルでは、実現象に近づけるため燃料を非理想流体とし、フガシティーを用いた気液平衡推算を行った。その際状態方程式には、異種分子間相互作用を考慮した Peng-Robinson 状態方程式を用いた。Peng-Robinson 状態方程式は次式で表される。

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{(V^2 + 2Vb - b^2)} \quad (1)$$

$$\alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (2)$$

$$T_r = T/T_c \quad (3)$$

$P$ : 圧力,  $T$ : 温度,  $V$ : 体積,  $R$ : ガス定数,  $\omega$ : 偏心係数,  $T_c$ : 臨界温度,  $a, b$ : 燃料の種類によって定まる定数

加えて、液滴表面から内部への熱伝達を考慮する二領域モデル<sup>10)</sup>と、質量移動項と温度移動項を個別に計算する( $Le = 1$ )修正 Spalding モデル<sup>11)</sup>を併用することにより、さらに実現象に近づけることとした。

#### 4.3. 液滴分裂モデルの最適化

オリジナルコードでは液滴分裂モデルとして TAB (Talor Analogy Breakup) モデルが採用されている。分裂後の液滴の粒度分布は自由度 $\phi$ の $^{-2}$ 分布で与えられ、オリジナルコードでは $\phi=2$ に設定されている。しかし、この場合ではディーゼル噴霧に適用した際、液滴径が過小に見積もられるため、本モデルでは $\phi=6$ とした修正 TAB モデル<sup>12)</sup>を用い、分裂後の液滴径の最適化を行った。

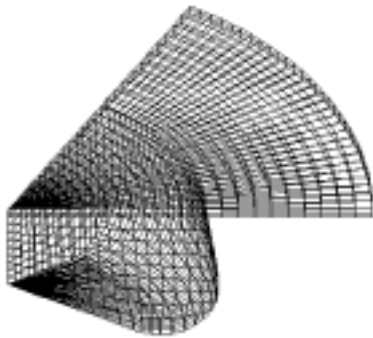


Fig. 3 Computational grid

#### 5. 計算条件

ベース燃料の軽油に関しては、物理的物性の近い n-トリデカンで代表させた他は、すべて実験条件と一致させている。本計算で用いた計算メッシュを図 3 に示す。実験で用いたエンジンの燃焼室形状や、表 1 に示したエンジン諸元と一致させており、約 20000 セルで構成されている。

#### 6. 実験および計算結果

##### 6.1. 筒内圧および熱発生履歴

各燃料の筒内圧および熱発生率を図 4 に示す。こ

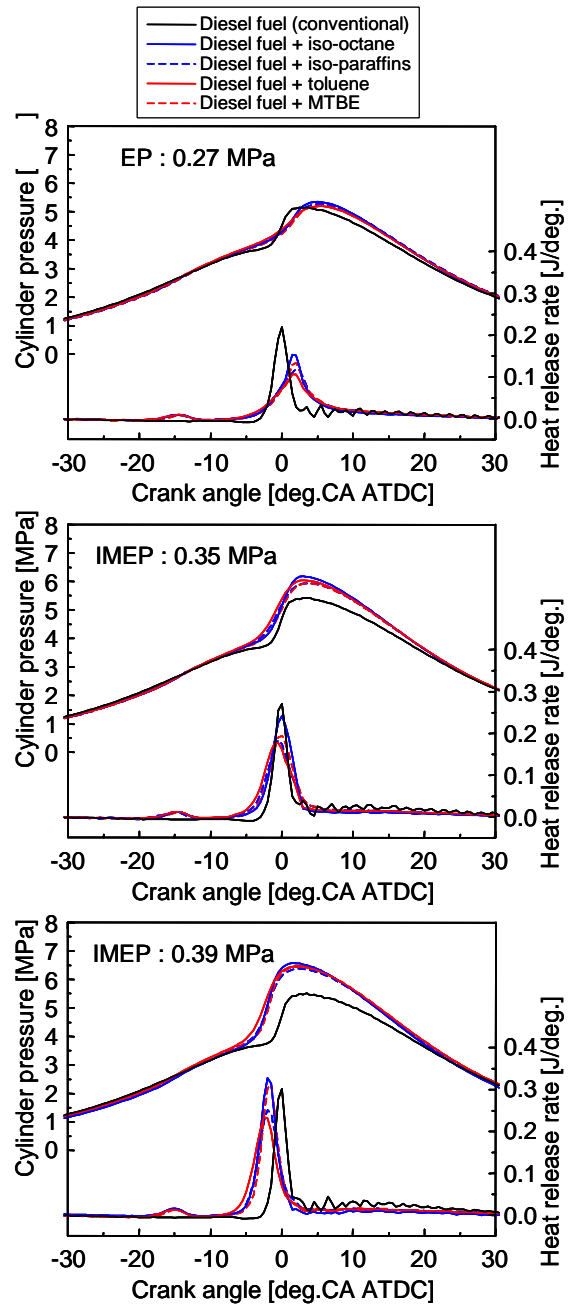


Fig. 4 Cylinder pressure and heat release rate

の図を含め、以下の実験結果には HCCI との比較のため、軽油のみを用いた従来のディーゼル燃焼の結果も併記している。この際の燃料の噴射時期は、上死点で熱発生率のピークを迎える -13.5 deg.ATDC とした。従来燃焼に関しては負荷の変化に関わらず着火時期はほぼ一定であるが、HCCI 燃焼の場合には、負荷の増大による筒内温度の増加が大きく影響し、着火時期は早期化している。また、従来燃焼では量論付近の混合気が多く存在するため、IMEP が 0.27 MPa の場合でもノックによる圧力振動が見られるが、HCCI 燃焼では希薄混合気の燃焼であるため、すべての燃料で従来燃焼よりも穏やかな熱発生となっている。さらに、軽油によるものと思われる低温酸化反応の熱発生時期は、いずれの燃料でもほぼ変化せず、負荷の増大によりそのピーク値が若干増加するに留まる。低温酸化反応の熱発生量は、その燃料の着火遅れと深い相関がある<sup>13)</sup>ことが知られており、この低温酸化反応における熱発生の傾向は、燃料の着火性がほぼ同等であることを示している。一方、高温酸化反応による熱発生のピーク値は常にイソオクタン添加の場合が最大値を取る。これは、イソオクタン添加の場合には平均沸点が低く、着火前に均一予混合気が多く形成されるためと考えられる。

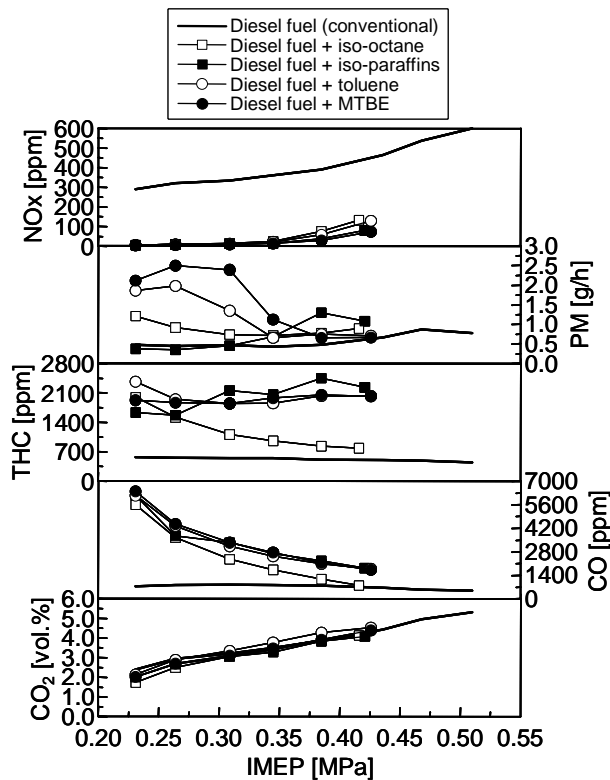


Fig. 5 Exhaust emissions

## 6.2. 排出ガス特性

各燃料の排出ガス特性を図 5 に示す。イソオクタン添加の場合において、上記の熱発生の増加により NOx 濃度が若干増加しているものの、HCCI のいずれの場合においても、従来燃焼に比べ大幅に NOx が低減されており、それぞれの燃料で有意な差異は確認できない。従来燃焼と着火がほぼ同時期であることから、この NOx 低減効果は、混合時間の増大に伴う混合気の希薄化によるものと考えられ、揮発性の低い軽油が混入されていても、予混合吸気式の HCCI に劣らない NOx 低減のポテンシャルを有する。また、直接噴射式の HCCI では、低密度場に燃料噴射をするため、液相ペネトレーションが増加し、THC、および CO の排出を増加させる懸念がある。しかし、イソオクタン添加の場合では、他の燃料に比べて平均沸点が低いため燃料の壁面付着量が減少し、THC および CO 濃度が顕著に低くなる。

上記の THC および CO 排出の相違を明確にするため、大きく違いが現れたイソオクタン添加とトルエン添加に関して、燃焼室内の混合気分布の数値解析を行った。IMEP 0.35 MPa における、各混合燃料の混合気分布を図 6 に示す。噴射角が 60° のノズルを使用しているため、ピストンキャピティ外への混合気の流出は回避されている。しかしながら、燃料が噴射される -60 deg.ATDC では雰囲気密度が低いため、噴霧は液相の状態では燃焼室壁面に衝突する。そのため、-50 deg.ATDC では燃料液滴が壁面に数多く存在している。この液滴の壁面衝突により、その後いずれの燃料成分においても、高濃度蒸気は常に燃焼室壁面近くに形成されている。特に、n-トリデカンに着目すると、イソオクタン添加に比べてトルエン添加の場合に、高濃度蒸気が壁面付近に多く存在していることがわかる。これは、n-トリデカンをより多く含むトルエン添加では、多量の n-トリデカンが液相の状態では壁面に衝突し、液膜を形成することに起因するものである。したがって、トルエン添加の場合には、壁面近傍における火炎のクエンチングが生じやすく、これが THC および CO の多量な排出につながったものと思われる。

PM に関しては、含酸素燃料である MTBE は黒煙低下の効果をも有する<sup>14)</sup>ため、MTBE 添加の場合に最も低い値を取ると予想されるが、本実験では逆に最も排出量が多い結果となった。次節では、この傾向の原因を把握するため、PM の成分分析を行った結果について述べる。



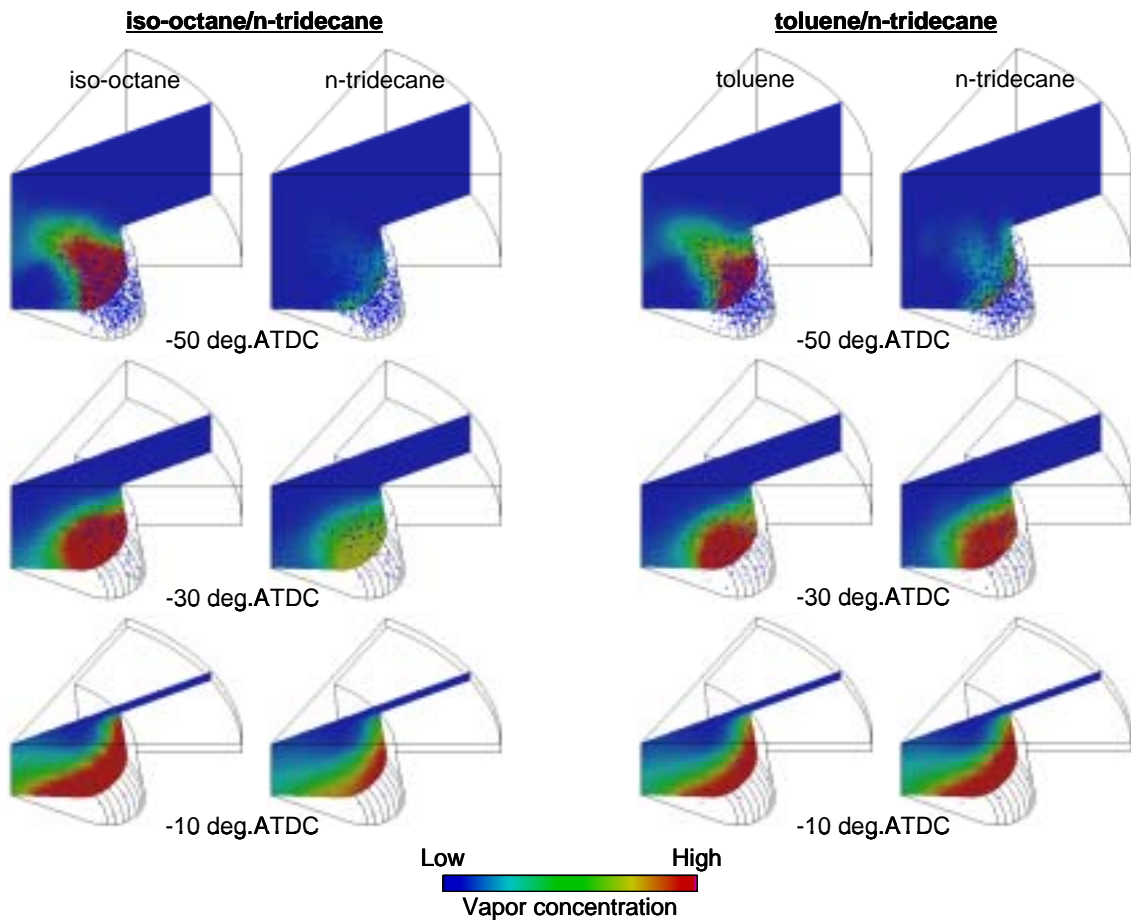


Fig. 6 Liquid droplet and vapor distributions

### 6.3. PM 中の成分分析

PM 中の SOF と ISOF の割合を図 7 に示す。イソパラフィン系添加の場合で ISOF が極端に多く、高負荷の条件では従来燃焼と比べても約 5 倍排出している。これは、平均沸点の上昇による局所的な過濃混合気の生成と、高級イソパラフィン系のすす生成能の高さ<sup>15)</sup>が影響したものと考えられる。また、上記のように含酸素系の MTBE 添加における ISOF 分は、同じ軽油割合でベンゼン環を含むトルエン添加より低いものの、平均沸点の低いイソオクタン添加よりも高い。MTBE 自体はすす抑制能に優れているものの、軽油を多く含んでいるために平均沸点が高く、軽油自身のすす生成能が高いため、このような現象が生じたものと考えられる。

SOF の排出量に関しては、すべての HCCI で従来燃焼に比べて高い値を取っている。SOF には軽油中の高沸点分の量が深く関与している<sup>16)</sup>との報告があることから、本実験でもその関連性を明らかにするため、各燃料の軽油の混合割合と SOF 排出量の関係を調べた。その結果を図 8 に示す。HCCI 燃焼の場合、軽油の混合割合に対して、SOF の排出量がほぼ比例

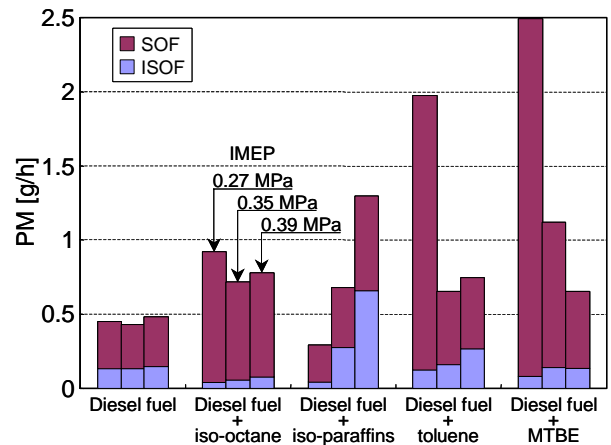


Fig. 7 SOF and ISOF in PM

的に増加していることがわかる。したがって、この HCCI における SOF の増加は、図 6 の計算結果でも言及したように、壁面付着などの影響により未燃の軽油の高沸点分が排出されたのが原因であると考えられる。一方、負荷の増加に伴い筒内温度および壁面温度が上昇し、SOF 分の熱分解が進むため、その傾向は弱くなる。特に IMEP が 0.39 MPa の場合には、

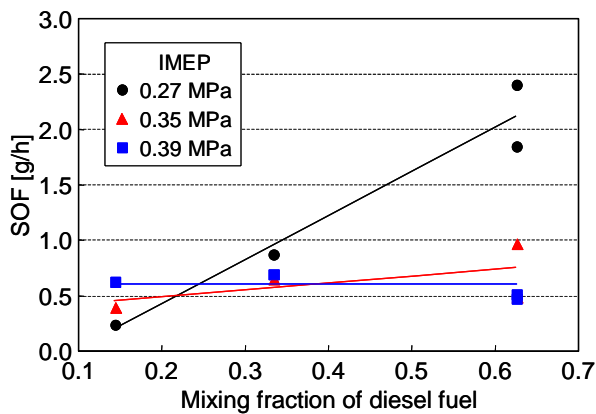


Fig. 8 SOF vs. mixing fraction of diesel fuel

それぞれの軽油の混合割合に関わらず，SOF 分の排出量は一定となる。

ガスクロマトグラフを用いて SOF を分析した結果を図 9 に示す．このグラフには，エンジンオイルおよび軽油の測定結果も併記している．軽油には，C18 から C19 の低揮発成分が含まれており，エンジンオイルはそれ以上の低揮発成分のみで構成されている．SOF の測定結果はすべての燃料で 2 つのピークを持っており，高揮発側のピークは，軽油の低揮発成分と，低揮発側のピークはエンジンオイルと一致している．したがって，排気ガス中の SOF は，軽油の低揮発成分とエンジンオイルの未燃分から構成されていることがわかる．さらに，SOF の測定結果において，エンジンオイル由来のピーク値は各燃料間で変化していないのに対して，軽油の低揮発成分由来のピーク値は，軽油の混合割合が増すにつれて増加している．すなわち，図 8 で示したように SOF の主成分は軽油の低揮発成分であることが，この分析結果からも確認できる．

## 7. まとめ

軽油に高オクタン価燃料を添加した混合燃料を用いて，HCCI の燃焼・排気特性に与える燃料性状の影響を調査した結果，以下の知見が得られた．

- (1) すべての混合燃料で着火特性は同等であるため，軽油のものと思われる低温酸化反応の時期はほぼ一定である．
- (2) 平均沸点が低いイソオクタン添加では，着火遅れ期間中に予混合気が多く形成されるため，高温酸化反応による熱発生率のピーク値が大きい．
- (3) 低揮発性の軽油が含まれる混合燃料を用いても，NO<sub>x</sub> 濃度は従来燃焼に比べて大幅に低下し，それぞれの燃料で有意な差異は認められない．

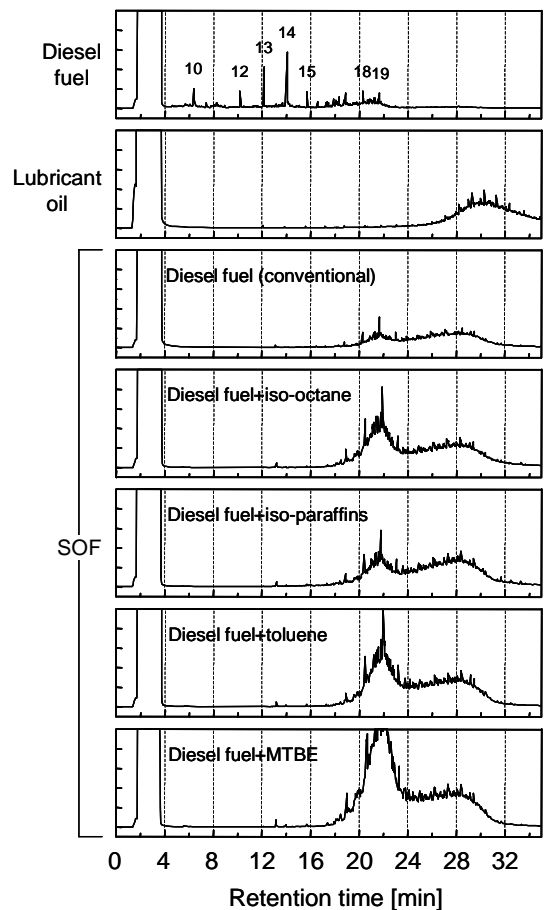


Fig. 9 Gas chromatograms

- (4) THC, CO 濃度は HCCI 燃焼で増加するものの，平均沸点の低いイソオクタン添加の場合は軽油の壁面付着量が少ないため，他の混合燃料に比べて極端に低い．
- (5) イソパラフィン系添加の場合は，高級イソパラフィン自身のすす生成能が高いために ISOF が多く，その他の混合燃料の ISOF 排出量は軽油の混合割合に比例する．
- (6) SOF は未燃の軽油の高沸点成分に起因するため，燃料中の軽油の混合割合に対して，軽負荷では SOF の排出量はほぼ比例的に増加するが，負荷が高くなるにつれて熱分解が進行し，その影響は少なくなる．

以上より，軽油と高オクタン価成分の混合燃料を HCCI に適用した際，EGR を適用しないにもかかわらず，NO<sub>x</sub> 濃度は極めて低い値を示すことがわかった．特に良好な排気特性が得られたイソオクタンは，ガソリンの性状と類似しているため，イソオクタンの代わりに製造・入手が容易なガソリンを代用しても超低 NO<sub>x</sub> が実現できるものと思われる．しかしながら，従来の HCCI の欠点である THC, CO に加え，

SOF も大幅に増加することが明らかとなった。つまり、噴射角を 60° に設定することにより、キャビティ外への燃料の流出を防ぐことができて、低密度場に噴射する限りは液相ペネトレーションが増加し、液相状態での壁面衝突、およびそれに伴う高沸点成分の壁面付着により未燃分が多く排出される。したがって、これらの排出を抑制するには、近年行われている上死点近傍噴射による HCCI<sup>17-18)</sup> に代表されるように、液相ペネトレーションを減少させる手法を講じることが必要である。さらにノッキングにより運転範囲は制限されるため、EGR などで燃焼を緩慢にすることで、急激な圧力上昇を抑えることも必要であろう。

なお、本報告では着火制御手法として軽油に高オクタン価成分を混合したが、既存のディーゼル機関に適用する利便性から考えると、軽油のみで HCCI を実現できることが望ましい。したがって、今後は軽油 HCCI 実現に向けた実験解析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Najt, P. M. and Foster, D. E. : Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion, SAE Paper 830264.
- 2) Dec. J. E. and Sjöberg, M. : A Parametric Study of HCCI Combustion – the Sources of Emissions at Low Loads and the Effects of GDI Fuel Injection, SAE Paper 2003-01-0752.
- 3) Aceves, S. M., Flowers, D. L., Martinez-Frias, J., Smith, J. R., Dibble, R., Au, M. and Girard, J. : HCCI Combustion : Analysis and Experiments, SAE Paper 2001-01-2077.
- 4) Ryan, T. W. and Callahan, T. J. : Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel, SAE Paper 961160.
- 5) Thring, R. H. : Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines, SAE Paper 892068.
- 6) Christensen, M. and Johansson, B. : Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) with Exhaust Gas Recirculation and Pilot Fuel, SAE Paper 2000-01-1835.
- 7) Amsden, A. A. et al. : KIVA3V : A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves, Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS, (1997).
- 8) Kawano, D., Senda, J., Wada, Y., Fujimoto, H., Goto, Y., Odaka, M., Ishii, H. and Suzuki, H., “Numerical Simulation of Multicomponent Fuel Spray”, SAE Paper 2003-01-1838, (2003).
- 9) Ely, J. F. et al. : NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixture Database (SUPERTRAPP) Users’ Guide, (1992).
- 10) Curtis, E. W. et al. : A New High Pressure Droplet Vaporization Model for Diesel Engine Modeling, SAE Paper 952431, (1995).
- 11) Abramzon, B. et al., : Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations, Int. J. Heat Mass Transfer, 32(9), pp.1605-1618, (1989).
- 12) Dan, T. et al. : Organized Structure and Motion in Diesel Spray, SAE Paper 970641, (1997).
- 13) Tanaka, S., Ayala, F., Keck, J. C. and Heywood, J. B. : Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives, Combustion and Flame, Vol. 132, p. 219-239, (2003).
- 14) 鈴木央一, 石井 素, 小池章介, 小高松男 : 均一予混合圧縮着火燃焼によるディーゼル機関の超低公害化への試み, 交通安全環境研究所報告, No. 1, (2002).
- 15) Takatori, Y., Mandokoro, Y., Akihama, K., Nakakita, K., Tsukasaki, Y., Iguchi, S., Yeh, L. I. and Dean, A. M. : Effect of Hydrocarbon Molecular Structure on Diesel Exhaust Emissions Part 2 : Effect of Branched and Ring Structures of Paraffins on Benzene and Soot Formation, SAE Paper 982495.
- 16) 小川忠雄 : ディーゼル排出ガスに及ぼす軽油性状の影響 第 2 報) 軽油特性とパーティキュレート量の関係解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 32, No. 2, p. 87-98, (1997).
- 17) Shimazaki, N., Tsurushima, T. and Nishimura, T., “Dual Combustion Concept with Premixed Diesel Combustion by Direct Injection near Top Dead Center”, SAE Paper 2003-01-0742, (2003).
- 18) Okude, K., Mori, K., Shiino, S. and Moriya, T., “Premixed Compression Ignition (PCI) Combustion for Simultaneous Reduction of NOx and Soot in Diesel Engine”, SAE Paper 2004-01-1907, (2004).