

# 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4報）

- 予混合圧縮着火機関に及ぼす燃料性状の影響 -

環境研究領域 内藤 浩由 川野 大輔 鈴木 央一 石井 素 後藤 雄一 小高 松男

## 1. 緒言

ディーゼル機関は、高効率で優れた耐久性を持つことから、商用車に広く使用されている。しかしながら、シリンダ内に噴射された燃料が十分拡散せず、不均一な状態で燃焼が行われるために、局所当量比の高い領域が存在する。そのため、局所高温場の形成による、急激な NO<sub>x</sub> 増加、不均一化に伴う、粒子状物質の生成などが問題となる。低レベルの排出を実現するには、従来技術の改良のみでは、非常に困難であると考えられており、燃料組成の変化、新燃焼法、および触媒等の後処理の複合的技術により、低エミッションの実現を達成する試みが、各方面で活発に行われている<sup>(1)</sup>。

そこで本研究は、NO<sub>x</sub> と粒子状物質の同時削減、そして、従来のディーゼル燃焼に比べ、低い燃料消費率の可能性があり、均一予混合圧縮着火燃焼 (Homogeneous Charge Compression Ignition) に着目した。これらの研究では、供試燃料としてガソリン系成分やガス燃料のように、一般のディーゼル機関に使用されている軽油系の燃料のほか、大幅に組成の異なる高オクタン価燃料が多くの研究で用いられている<sup>(2)</sup>。これは、軽油系成分の揮発性が低いのに加えて、セタン価が高く過早着火が生じ、HCCI には不適当なためである。

また、より広い負荷域に対応する HCCI 機関を想定した際には、燃料の着火前に可能な限り希薄均一予混合気を形成する必要がある。したがって、既存の直接噴射式ディーゼル機関に、それらの高オクタン価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、燃料噴射系の改造が必要となる<sup>(3)</sup>。そこで本研究は、既存の直接噴射式ディーゼル機関への適用の利便性を考慮し、噴射系の改良は、噴射ノズルの燃料噴射角の狭角化のみとし、供試燃料に

は、軽油をベースとして高オクタン価成分を混合したものをを用いた。また、着火制御を行いながら、その際の HCCI の燃焼および排気特性を解析し、軽油をベース燃料とした混合燃料の HCCI への適応性を、実験的に検証する事を目的とする。

## 2. 実験装置及び方法

Fig. 1 に、本研究で使用した、実験装置の概略図、及び機関の諸元、実験条件をそれぞれ表 1、2 に示す。エンジンは、4 サイクル水冷単気筒エンジンを使用し、各測定が行われた。NO<sub>x</sub> の計測は、化学発光方式 (CLT) を用い、さらに CO、CO<sub>2</sub> の測定には、非分散型赤外線吸収式 (NDIR) を用いた。また THC の計測には、火炎イオン化検出器 (FID) を用い (堀場製作所: MEXA-7100)、PM 計測は、希釈トンネ

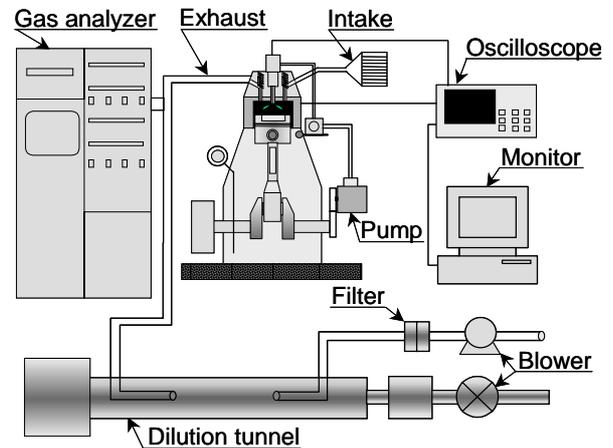


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system

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

**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

ルが使用され、15 分間の定常運転のあと、フィルターに捕集した。また、燃焼室内に、圧力センサーを挿入し、20 サイクルの平均筒内圧力データより、熱発生率を解析した。また、排気管出口に熱電対が挿入されており、各負荷に対する平均燃焼ガス温度を測定した。

今回、燃料噴霧による燃焼器側壁での液滴付着を考慮にいれ、噴霧角度を 60 deg.にし、さらに噴霧時期は、予混合気形成期間をそろえるため、上死点前 60 deg.一定とした。また、噴霧時期の早期化は、噴射系の制御上不可能となり、この角度で、均一予混合化を狙っている。

さらに、今回使用した、燃料の物性値を表 3 に示す。ベース燃料には、硫黄分 10ppm の軽油を用い、添加する炭化水素燃料には、Iso-paraffin 系の Iso-octane、芳香族系の Toluene、含酸素燃料の MTBE、そして、Iso-paraffin 系の高沸点のみを混合した多成分燃料(Iso-paraffins)を使用した。混合割合の値は、単位体積のベース軽油に対する、各燃料の体積割合を示しており、噴霧時期を 60deg.に固定させ、各混合燃料が上死点燃焼するように、混合割合を決定している。

すなわち、混合時間が同じで、熱発生率を一致させる事は、着火制御と同義であり、着火制御を行いながら、沸点が異なる燃料による影響、もしくは、ベンゼン環を含む、燃料に対する排出特性の変化、さらには含酸素燃料(MTBE)使用時の排出特性の変化など、燃料性状に対する、燃焼-排出特性が評価できる。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1. 筒内熱発生率および圧力分布

Fig.2 は、各燃料に対する、筒内圧および熱発生率を示す。各混合燃料との比較のため、軽油のみの従来燃焼の結果も併記した。この際の燃料噴射時期は、-13.5 deg.ATDC であり、混合燃料と同様に、圧縮上死点で、熱発生ピークを迎えるように調整した。軽油による従来燃焼に比べ、HCCI 燃焼では、全ての燃料で、穏やかな熱発生となっているのが分かる。

従来燃焼に関しては、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、IMEP 増加とともに、早期化しているのが分かる。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は、燃料の着火遅れと深い相関があることが知られており<sup>(2)</sup>、この低温酸化反応における熱発生の傾向は、燃料のセタン価がほぼ同等であることを示している。

**Table 3. Properties of each fuel**

	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]	-	431.3	513.1	487.8	466.8

一方、高温酸化反応による熱発生のピークの値は、常に Iso-octane 添加の場合が最大値を取る。これは、Iso-octane 添加の場合には、燃料の平均沸点が低く、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<sup>(3)</sup>。

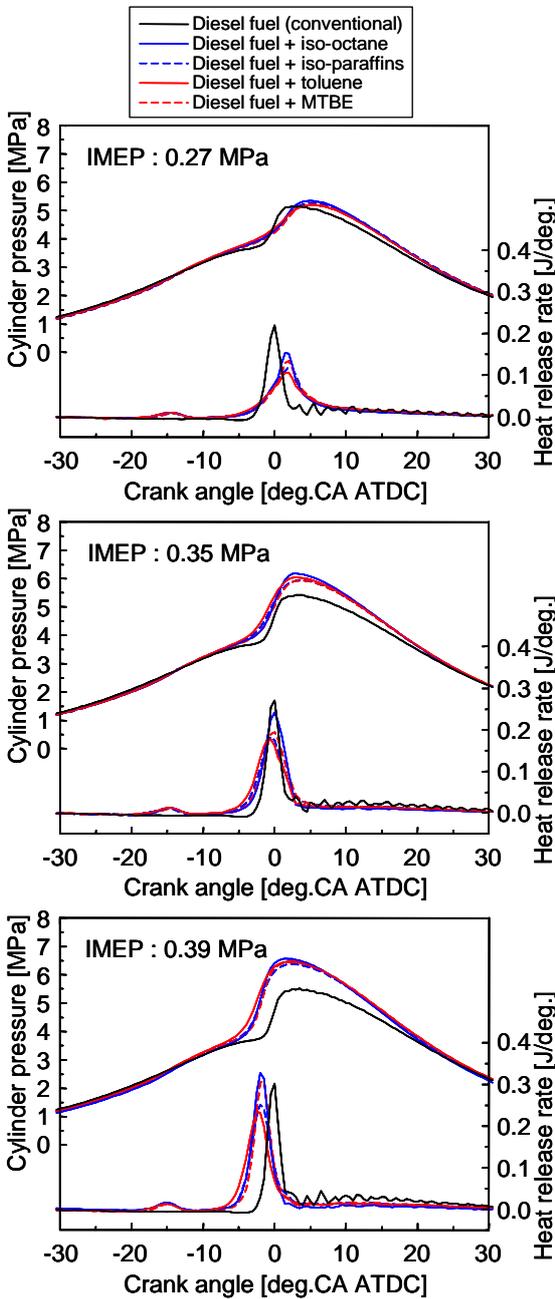


Fig. 2. Cylinder pressure and heat release

### 3.2. 排出ガス特性

3.2.1. 各化学種排出特性 各燃料に対する、排出ガス特性を Fig.3 に示す。NO<sub>x</sub> 濃度に着目すると、従来の軽油のみの排出と比べ、混合燃料に対する NO<sub>x</sub> 排出特性は、非常に優れており、揮発性の低

い軽油燃料を混合させても、予混合吸気式の HCCI に劣らない NO<sub>x</sub> 排出特性を示している。混合燃料に対する排出傾向は、非常に類似しており、僅かに Iso-octane の NO<sub>x</sub> 排出量が高くなっている。これは、先に示した高い IMEP では、熱発生率が、他の混合燃料と比べ高く、温度依存性の高い Zeldovich 機構の寄与が増大するためと考えられる。また、直接噴射式の HCCI では、低密度場に燃料噴霧するため、液層のペネトレーションが増加し、燃料の壁面付着量の増加により、THC、及び、CO の排出を増加させる懸念がある。しかし、Iso-octane 添加の場合では、平均沸点の低下により、液層ペネトレーションが減少し、燃料の壁面付着量が減少するため、THC 及び CO 濃度が顕著に低くなると考えられる<sup>(3)</sup>。

更に、PM に関しては、含酸素燃料である MTBE は、黒煙低減の効果を有するため、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、逆に高い排出量となった。これは、MTBE 燃料の混合割合が少ない事により、顕著な効果が得られなかった事<sup>(1)</sup>、さらには、低い IMEP では、燃焼器内温度が低いため、軽油燃料による、高沸点成分が残留し、高い PM 排出特性になると考えられる<sup>(3)</sup>。

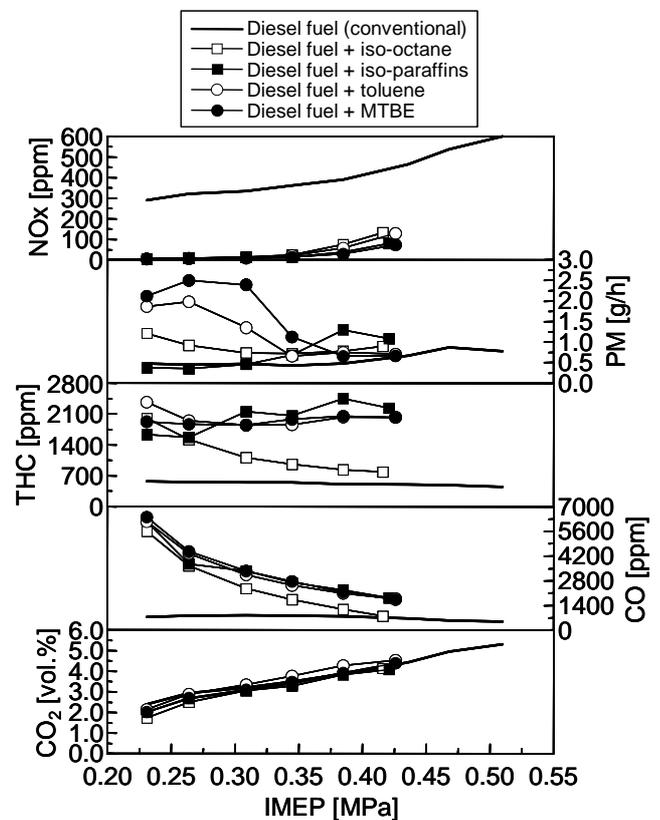
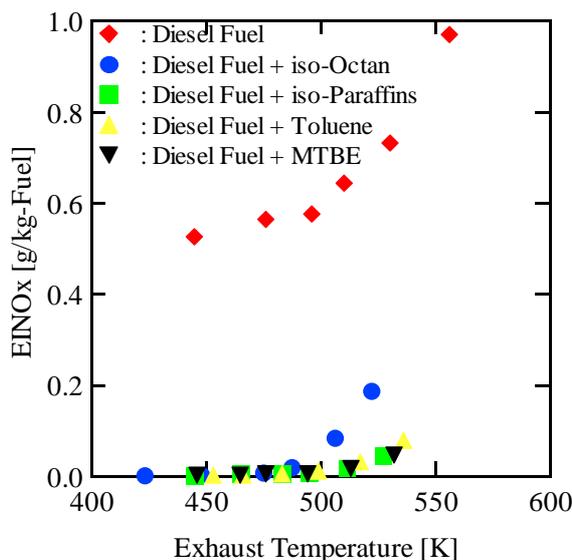


Fig. 3. Emission characteristics of HCCI

**3.2.2. NOx 排出特性** Fig.4 に、排気温度に対する、NOx エミッションインデックス(EINOx)を示す。HCCI 燃焼に使用した、各混合燃料は、どれも非常に低い EINOx の値をとる。排気ガス温度が 500 K 以上になると、僅かに、Iso-octane 混合燃料の EINOx が高くなるが、しかし最大で、0.2 g/kg-fuel と極めて優れた排出特性を示している。通常、工業用ボイラで得られる、EINOx は、3~18 g/kg-fuel と言われており<sup>(4)</sup>、また、非常に低エミッションを達成する強乱流予混合火炎においても、1.0~2.3 g/kg-fuel の値<sup>(5)</sup>をとる事から、HCCI 機関において各混合燃料で得られる EINOx は、極めて低い事がわかる。従来燃焼を行っている軽油燃料の EINOx は、500 K までほぼ変化せず、その後、排気温度の上昇に対し直線的に増加している。また、各混合燃料も同様に、500 K 付近まで、EINOx の変化は無く、排気ガス温度上昇と共に、リニアに増加傾向を示す。温度依存性の高い Zeldovich 機構の律速反応式、



の活性化エネルギーは、319050 kJ/kmol<sup>(4)</sup>と非常に高く、HCCI 燃焼レベルでの排気ガス温度では、この機構は重要ではない。しかし実際には、排気ガス温度 500 K 以上では、温度依存性が観測される。これは、(R1)において、温度が上昇すると、熱解離による影響が顕著となり、酸素原子濃度、速度定数の増加を招くことから、律速となる正方向の反応速度を増加させるためと考えられる。すなわち、高い

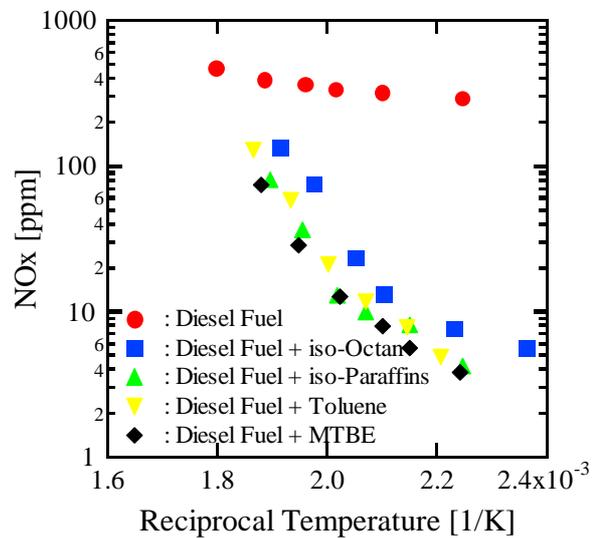


**Fig. 4. EINOx for exhaust temperature on a HCCI engine**

IMEP の領域では、本機構による NO 生成の寄与があり、排気ガス温度上昇に伴い、EINOx 濃度が上昇すると考えられる。

また、IMEP 0.35 MPa以下での排ガス温度、すなわち、500 K以下の温度では、熱的依存性は、確認されない。太田ら<sup>(6)</sup>によれば、予混合圧縮着火では、熱炎自着火が発生した瞬間には、すでにかかなりの量のNOが生成されており、Prompt NOに近い機構となる事を分光学的に示している。また低温酸化反応部では、HCHOに続いてCH,HCNが生成され、Prompt 機構によってNOの生成が開始すると言われている<sup>(4)</sup>。すなわち、Fig. 2 に示した、各混合燃料に対する、熱発生率をみれば、どの混合燃料も、低温酸化反応が生じている事が確認されており、低負荷、高負荷領域共に、Prompt NO機構の寄与があり、負荷による各機構の寄与割合が異なると考えられる。

そこで、NOx の温度依存性について Fig.5 に示す。NOx 濃度と燃焼排ガス温度との間に Arrhenius の式が成り立つと仮定し、活性化エネルギーの算出を行った。その結果、表 4 に示すように、各燃料で得られる活性化エネルギーは、それぞれ 9.9~22.1 kcal/mol である。



**Fig. 5. The dependence on a temperature of NOx formation**

**Table 4. Activation energy of each fuel**

Fuel	Activation Energy [kcal/mol]
Diesel Fuel	9.955
Diesel Fuel + iso-Octane	21.79
Diesel Fuel + iso-Paraffins	12.03
Diesel Fuel + Toluene	22.12
Diesel Fuel + MTBE	16.35

Zeldovich 機構において、律速となる反応式(R.1)の活性化エネルギーは、75.5 kcal/mol であり、すなわち、各燃料で見積もられる活性化エネルギーは、低い反応経路をたどり NO<sub>x</sub> 生成される事となる。

上述したように、IMEP 0.35 MPa 以上の負荷においては、Zeldovich 機構による寄与があると言及したが、その機構の律速となる活性化エネルギーと、本研究で見積もられた活性化エネルギーとは、差違が生じる。その理由として、高負荷の領域では、燃焼ガスは、高温なため、非平衡なラジカル濃度(ラジカルオーバーシュート)が燃焼ガス中にかなりの量で存在する。もう一つの Zel'dovich 機構の反応式



(R.2)の活性化エネルギーは、6.5 kcal/mol であり<sup>(4)</sup>、本機関で見積もられたものに近いこと、また HCCI 燃焼では、全体当量比が 0.1 ~ 0.3 の範囲となり酸素濃度が高いことを考えれば、高負荷領域においては、(R.2)による NO 生成が大きくなると考えられる。

すなわち、各混合燃料を使用した HCCI 燃焼の NO<sub>x</sub> 排出特性は、低 NO<sub>x</sub> の排出性能を有した燃焼形態であり、また活性化エネルギーの算出から Prompt 機構が支配的であると考えれば矛盾がない。

**3.2.3. PM 排出特性** 高速溶媒抽出法 (ASE 法) を用いて、計測した PM から、可溶成分(SOF)を抽出し、PM 中の SOF と不可溶成分(ISOF)の割合を算出した。その結果を Fig.6 に示す。Iso-paraffins 系添加の場合で、ISOF が極端に多く、高負荷の条件では、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 Iso-paraffins 系の、すす生成能の高さが影響したと考えられる。

また、上記のように、含有酸素系の MTBE 添加における ISOF 分は、ベンゼン環を含む、Toluene 添加より低いものの、平均沸点の低い Iso-octane 添加よりも高い。MTBE 自体は、分子中に酸素を含む事から、すすの排出抑止に優れているが、燃料全体の平均沸点が高いため、このような現象が生じたものと考えられ、混合気の希薄均一化による、すす排出の抑止効果は、大きいと考えられる。

SOF の排出量に関しては、従来燃焼に比べ、全ての HCCI で高い値を示す。SOF には、軽油中の高沸点分の量が深く関与している報告<sup>(7)</sup>があることから、本実験でもその関連性を明かにするために、各燃料と軽油の混合割合と SOF 排出量の関係を調べた。その結果を Fig.7 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的に増加している事がわかる。従って、この HCCI における SOF の増加は、壁面付着などの影響により、軽油の高沸点成分が未燃で排出された事が原因であると考えられる<sup>(3)</sup>。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 0.39MPa の場合には、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。

さらに、各全体当量比に対し、PM と SOF 量を、Fig.8 にまとめている。PM(SOF+ISOF)と SOF 量は、全体当量比が 0.20 付近までは、急激に減少し、それ以上の当量比に対しては、ほぼ一定な値を取る。

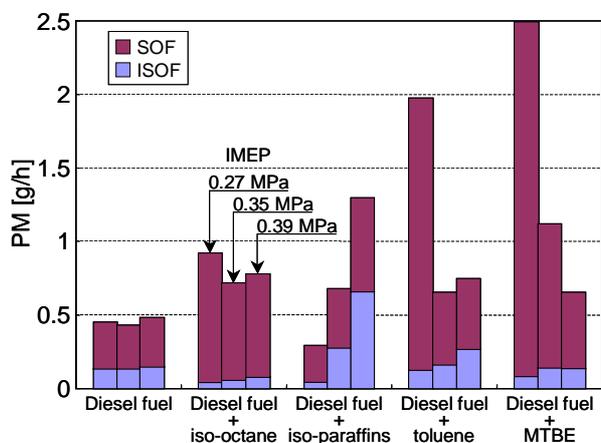


Fig. 6. Ratio of SOF and ISOF in PM emission

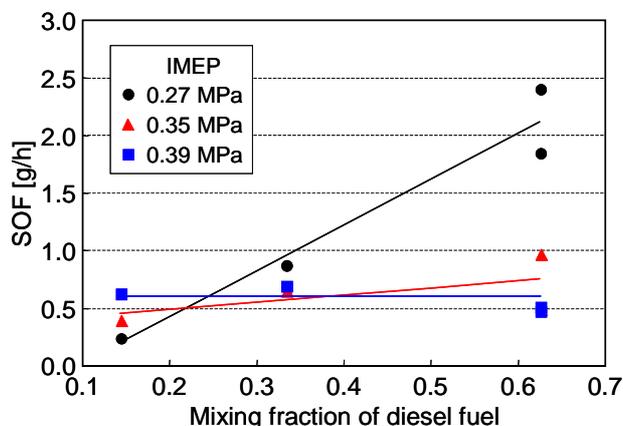


Fig. 7. SOF vs. mixing ratio of diesel fuel

低い全体当量比は、低負荷領域に対応し、機関内の温度が低く、上述したように、軽油の高沸点成分が未燃で排出され、全体のPM量が增加したと考えられる。逆に、当量比の高い領域は、負荷の高い領域に対応し、PM、SOF量は、それに伴い低くなる。この傾向は、Fig.6、7で示した、排出特性と類似する。また、PMとSOF量との関係は、非常に高い相関性があり、HCCI燃焼における、SOF量の多さを定性的に示している。上述したように、HCCI燃焼における、SOF量の増加は、低い全体当量比と、低い燃焼器内温度が主たる原因であると考えられる。

以上のように、熱発生履歴では、顕著な差は生じないものの、排気ガス特性は、それぞれの燃料組成で大きく異なる。特に、HCCIに関する従来の研究<sup>(8)</sup>からも言及されているTHC、およびCO濃度の増加に加え、SOF分の増加も軽油を用いたHCCIでは大きな課題となる。しかし、噴霧、燃焼特性を考慮した、それぞれの機関に適する添加燃料の選定と、その添加量により対処が可能と考えられる。

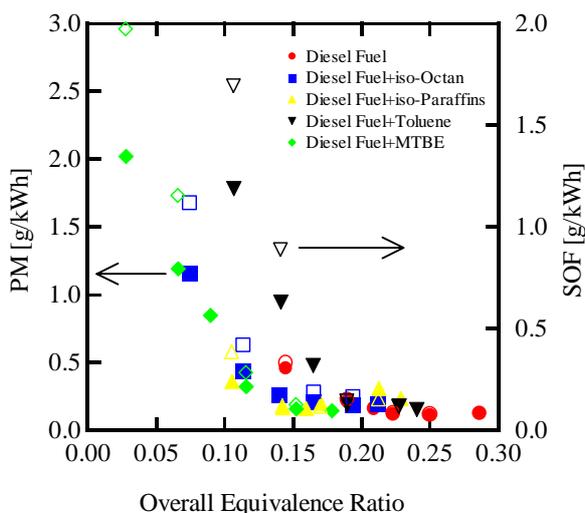


Fig. 8. Overall equivalence ratio vs. PM and SOF

#### 4. まとめ

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、以下の結言が得られた。

- (1) いずれの燃料においても、軽油のものと思われる低温酸化反応の時期は、ほぼ一定となり、低沸点の Iso-octane との混合燃料が最も高い熱発生率を示す。
- (2) HCCI燃焼による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はない。

- (3) 活性化エネルギーは、9~22 kcal/molであり、Prompt NO 機構の生成が支配的であると考えられる。
- (4) THC、CO濃度は、平均沸点の低い Iso-octane 添加の場合で最も低い排出特性を示す。
- (5) 燃料の平均沸点の低下は、ISF排出量の低減に有効であり、燃料中の軽油の混合割合に対して、SOFの排出量は、ほぼ比例的に増加する。また、全体当量比の増加に伴い、SOF、及びPMは、急激に減少している。

#### 謝辞

本実験の遂行に際し、燃料を提供していただいた新日本石油(株)の柴田元氏、ならびにSOFの抽出に御協力いただいた当研究所の堀重雄氏に謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 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), pp.1-32.
- (2) 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, (2003), pp. 219-239.
- (3) 川野大輔, 内藤浩由, 鈴木央一, 石井素, 後藤雄一, 小高松男, "予混合圧縮着火機関の燃焼・排気特性に与える燃料性状の影響", 自動車技術会学術講演会前刷集, NO64-03, (2003), pp.5-8.
- (4) Stephen R. Turns, "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill, Inc, (1996), Chapter 4-5, 15.
- (5) A. Yoshida, K. Hirose, Y. Kotani, "Structure and Formation in Premixed and Non-Premixed Opposed Jet Burner", Proceedings of The 5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, (1997), pp.304-309.
- (6) 太田安彦, "ピストン圧縮低温度着火", 燃焼研究, 95号, (1994), pp.53-67.
- (7) 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, (1997), pp. 87-98.
- (8) Nicolas DOCQUIER, "Experimental investigations in an optical HCCI Diesel engine", Proceedings of 19<sup>th</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, (2003), pp.1-5.