

# 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

鈴木 央一<sup>1</sup> 石井 素<sup>1</sup> 小池 章介<sup>1</sup> 小高 松男<sup>1</sup>

## Ultra Low Emission Techniques of Diesel Engines with Homogeneous Charge Compression Ignition Method

Hisakazu Suzuki, Hajime Ishii, Noriyuki Koike, Matsuo Odaka

The objective of the study is to search fuel and combustion improving methods for ultra low exhaust emission from heavy-duty diesel engines aimed at post-long term emission regulations.

In order to realize this purpose under wide load range, a new combustion control method is proposed. This is based on a concept of combustion based on a concept of homogeneous charge with diesel combustion(HCDC), where most of the fuel is supplied for pre-mixed homogeneous charge that is ignited by a small amount of direct injected diesel fuel into a cylinder. We refer this method as homogeneous Charge Compression Ignition. The required characteristics of fuel for this combustion method and their optimization method will be also studied.

Consequently, the following results were clarified.

- (1) By the homogeneous charge compression ignition method, drastic reduction of soot is possible. Although only little reduction effect was observed for NOx at lower premixed fuel ratio, NOx was rapidly decreased when pre-mixed fuel ration goes to 80% or higher. These emission improvements were possible under wide load range.
- (2) When pre-mixed fuel ratio went up as far as near miss-fire region at over-all air-fuel ration about 30, some operating regions existed where NOx went down drastically to 50 ppm or lower. The minimum required quantity of injected fuel for compression ignition is affected by surrounding mixture air fuel ratios and it becomes smaller as load goes to higher. However, it is limited by knocking etc. However, drastic increase in unburned HC was observed. This is one of the problems to be improved.
- (3) NOx reduction effect of this combustion method has been studied by direct combustion observation with an experimental single cylinder diesel engine. At homogeneous charge compression ignition combustion, almost no luminous flame was observed and thereby it has different combustion characteristics from conventional diesel combustion. If perfect homogeneous pre-mixed charge were produced in the cylinder, the charge could be ignited by tiny amount of direct injected fuel and after the ignition, the homogeneous lean combustion may occur in the whole region in the cylinder.
- (4) NOx reduction effect of this combustion method has been studied by numerical simulation. According to above reason, there is no local high temperature spot and then NOx formation can be suppressed greatly. EGR can be also effective for further reduction of NOx as conventional diesel combustion.
- (5) By varying anti-knock characteristics of the pre-mixed fuel and applying EGR, very low NOx and smoke emissions have been obtained in wide range of engine operating regions.
- (6) The possibility of single fuel operation of HCDC with conventional diesel fuel has been conducted with consideration of combustion control method and fuel reforming. As results, although combustion controllability and worsen fuel consumption at heavy load regions were observed, it was found out that the low NOx combustion has been possible by adequate air fuel ratio control even in the case of high pre-mixed fuel ratios.
- (7) The possible operating regions of HCDC depend on equivalence ratio of the pre-mixture regardless of load conditions. Thereby the operation with high pre-mixed fuel ratio is possible under light load regions where equivalence ratio of the pre-mixture is low and extensive reduction of NOx and smoke is possible. However, at heavy load regions, it may be effective to combine other exhaust emission control methods to achieve higher reduction of exhaust components.
- (8) NOx and smoke reduction performance at heavy load regions can be improved drastically by optimizing the combination of premixed fuel ratio and start of injection of the direct injected fuel or super charging. However, EGR is not a practical

measure for exhaust gas reduction under HCDC operation.

- (9) By adding MTBE (Methyl-t-butyl-Ether) into diesel fuel, the start of ignition becomes later according to the amount of MTBE added. Hence, the combustion takes place closer to TDC and thereby fuel consumption is improved. Further reduction of NO<sub>x</sub> and smoke is also possible. Consequently, change of fuel property by adding MTBE can be a practical measure for the difficulties of HCDC operation at heavy load regions.
- (10) NO<sub>x</sub> and smoke reduction performance on both HCDC operation and conventional diesel operation by diesel fuel has been investigated at the Japanese 13 mode emission test. Compared with the conventional diesel operation, HCDC operation led to the almost same smoke emission level and about 10% reduction of NO<sub>x</sub> emission.
- (11) According to above-mentioned results, it is clarified that the homogeneous charge diesel combustion method may have high potentiality for pursuing ideal diesel combustion with high efficiency and low emissions.

## 1. まえがき

ディーゼルエンジンは高効率で優れた耐久性を持つことから、大型車を中心に広く用いられているが、排気中の窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )や浮遊粒子状物質(PM)が、都市環境の悪化に及ぼす影響が大きいといわれている。川崎市や尼崎市における公害訴訟では、行政側が幹線道路沿いの住民に対する自動車排出ガスの健康影響を認める形で和解しており、これまで平成元年12月の中央公害対策審議会からの答申などを受けてディーゼル自動車の排出ガス規制強化が行われてきてはいるものの、依然として深刻な状況にあるといえる。このため平成10年度に出された中央環境対策審議会第三次答申により、さらなるディーゼル車の排出ガス規制の強化が予定されることとなった。これらの規制値を達成するためには、 $\text{NO}_x$ を低レベルで維持しつつ、粒子状物質を大幅に低減するディーゼル車の超低公害化技術の開発が求められる。しかしながら、低レベルの $\text{NO}_x$ や粒子状物質質量となると、高圧噴射化、燃料噴射時期および燃焼室形状の最適化等の従来技術の延長のみでは達成が困難であると考えられ、これまでとは全く異なる抜本的な方策が求められる。

そのような現状に対して、

- ・ 燃料組成、性状
- ・ 新燃焼法
- ・ 触媒等の後処理

等のアプローチにより、排出ガスの飛躍的な改善を試みる動きが見られる。本研究では、新しい燃焼方式を用いることで燃焼制御による低公害化の可能性を追求し、理論的、実験的にその排出ガス低減効果を解析することとしている。

燃焼制御技術の改善による超低公害化手法として、空気利用率の飛躍的向上と、粒子状物質生成の要因である拡散燃焼の抑止を図り、また、 $\text{NO}_x$ については、局所的希薄燃焼化を達成することにより、両有害成分を同時に大幅低減することをねらいとしてフュミゲーション方式を基本とした新燃焼方式を提案し、理論的、実験的にその排出ガス抑止効果を解析する。

また、燃料に関して、現用の軽油は現用のディーゼル燃焼に適したものである。本研究で扱う新燃焼方式では、全く異なる特性の燃料が求められることも考えられる。そこで、燃料の揮発性や自己着火性等が着火、燃焼および排気特性におよぼす影響についても解析を行う必要がある。

さらにこれらの要素を組み合わせ、最適化した場合の低減限界を追求することにより、ディーゼル車の超低公害化を達成するための技術的方向性を明らかにしようとするものである。

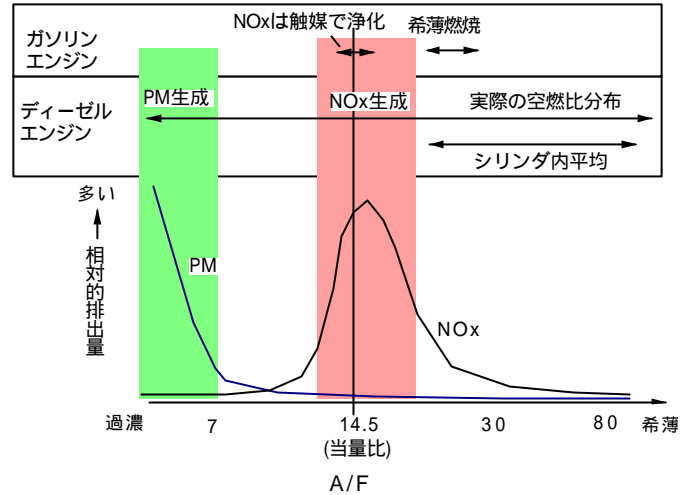


図1 ディーゼル機関およびガソリン機関の使用空燃比とPM、 $\text{NO}_x$ の相対的な排出量

## 2. 均一予混合圧縮着火燃焼の概念

現在のディーゼル燃焼と排出物の生成関係について把握するため、図1にディーゼル機関およびガソリン機関の使用空燃比とPM、 $\text{NO}_x$ の相対的な排出量を示す。ガソリン機関では原則的に空燃比を理論混合比に設定し、生成した $\text{NO}_x$ は触媒により浄化している。また、近年では、希薄燃焼を行うものも増えているが、それらでは空燃比を20以上とすることで、 $\text{NO}_x$ を多く排出する領域をさけ、安定した燃焼が確保できる30程度までの範囲を使用している。それに対して、ディーゼル機関では、シリンダ内平均をみると、希薄域の広い範囲を使用する。希薄混合気を用いたほうがエネルギー効率が高いことに加え、広い空燃比領域で安定した燃焼が行えることから、部分負荷運転時にも空気が絞りを必要としないため、ディーゼル機関は運転領域全般にわたり高い熱効率を確保できる。ディーゼル機関にはこのような優れた面があるものの、実際の燃焼室内は、シリンダ内に噴射された燃料が十分拡散しないまま、不均一な状態で燃焼が行われるため、現実には図に示すように、燃料過剰領域を含めた広い空燃比領域が存在する。そのため、平均空燃比では、 $\text{NO}_x$ もPMも少量しか生成されない範囲であるにもかかわらず、燃料過剰部分でPMが、理論混合比付近の部分から $\text{NO}_x$ が生成される。

このようなディーゼル燃焼の欠点を克服するためには、燃焼室内をなるべく均一化し、混合気分布が平均値に近い空燃比に集中するようになれば、 $\text{NO}_x$ 、PMの双方を低減できる可能性がある。そこで、吸気マニホールドに新たに燃料インジェクタを増設して、燃焼室内に均一混合気を形成した上で、従来ディーゼル燃焼で用いる燃焼室内直接噴射をあわせて行い、均一希薄かつ安定した燃焼を行うことを試みた。本研究では、

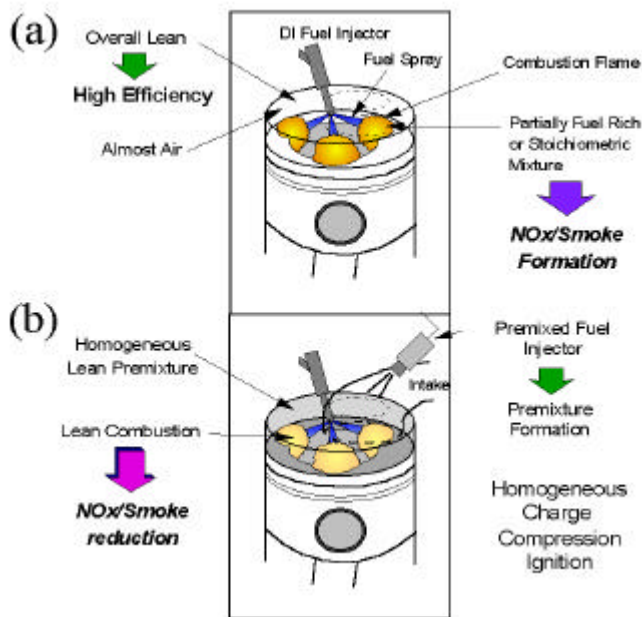


図2 現状のディーゼル燃焼と比較した予混合圧縮着火燃焼の概念

これを「均一予混合圧縮着火」方式と呼ぶこととする。この均一予混合圧縮着火の概念を従来型ディーゼル燃焼と比較したものを図2に示す。図2(a)に示す通常のディーゼル燃焼では、燃料をシリンダ内に噴射し、その燃料の一部が空気と十分混合しないまま燃焼が行われる。そのため、燃焼室内にほとんど空気のみ領域と燃料過剰領域、そしてその中間の理論混合比になる領域が存在し、図1で示したようにNOx、PMの生成につながる。それに対して、(b)で示す均一予混合圧縮着火燃焼では吸気に燃料を過半を噴射することで、着火前に希薄均一混合気を形成している。そこに少量の燃料をシリンダ内に噴射することで、NOxやPMが生成される空燃比領域を極力少なくしている。均一かつ希薄な予混合気を燃焼させる場合には、燃料の着火性が低い、あるいは予混合気が過度に希薄である場合には失火したり、活発な燃焼が行われない可能性がある。また、逆に着火性の高い燃料を用いた場合、ある程度以上の濃度を持つ予混合気が存在する場合は早期自己着火、いわゆるノッキングを起こす可能性もある。本方式では、2系統の燃料噴射を行うことで、失火が予期される条件では直接噴射燃料を増やして強力な着火源とすることで安定を図り、ノッキングが予想される場合には、予混合燃料噴射量を抑制することでノッキングを回避できる。こうして予混合燃料噴射量と、直接噴射燃料噴射量を適宜調節することで、広範な運転領域で排出ガス改善ができるものと考えられる。

このように予混合圧縮着火方式では、吸気に燃料噴射を行い予混合気を形成する点、また、そのための燃料としては圧縮

自己着火性の低い燃料が望ましい点など、ガソリン機関の燃焼に近づいていると見ることもできるが、高効率であるディーゼル機関の特徴である、高圧縮比である点、吸気絞り弁を持たず燃料噴射量のみで負荷を調節する点、さらに点火プラグを持たず多点着火による安定した燃焼を行う点、から従来とは異なる新しいディーゼル燃焼の試みと位置づけられると考える。

また、平成7年度より開始した本研究とほぼ期を同じくして、異なるアプローチで均一化・拡散化によるエミッション改善を試みた研究も発表されている。その代表的なものに、それまでNOx対策として遅角化が進められてきた燃料噴射時期を逆に上死点前60deg.CA以前と大幅に進角させることで、着火以前に均一予混合気化を形成することを試みた研究<sup>1)</sup>がある。さらに、この早期噴射化と組み合わせるさらなる改善を試みた研究として、複数の燃料噴射ノズルを用いて燃料噴霧の均一化を図る方法<sup>2)</sup>、ガイド付きノズルにより円盤状の噴霧を形成して拡散化を図るもの<sup>3)</sup>がある。反対に噴射時期を遅らせ、さらに大量EGRにより着火遅れを大きくすることで、均一化を図る試み<sup>4)</sup>や、気化性の良いガソリンを用いて希薄予混合気を圧縮自己着火させる方法<sup>5)</sup>も、着火以前の混合気均一化によるディーゼル燃焼の改善を試みた例といえる。これらの試みに共通するのは、可能な限り均一な希薄混合気を作り、ディーゼル機関の長所を損なわずに燃焼を行わせようという点にある。そして、いずれもNOx、粒子状物質同時低減の可能性を示唆しているが、自動車用機関に要求される、広範な運転領域における低エミッション性、着火制御性については問題を有している。それらの問題解決は、現在の超低公害化ディーゼル燃焼の研究の中でも大きな課題となっているが、未だに有効な手法は開発されていない。そのため、一部運転領域に均一化による低エミッション燃焼を行い実用エンジンのシステム全体での排出ガス改善に試みた<sup>6), 7)</sup>り、着火制御性向上のため圧縮自己着火現象の解明に向けた研究<sup>8), 9), 10)</sup>が行われている。本研究においては、軽油使用時の均一予混合圧縮着火にて実用上達成しうる改善レベルの把握のため、J13モードと等価な運転を行っている。

### 3. 研究の流れ

はじめに予混合圧縮着火方式による排出ガス低減の可能性を検証するために、着火性の異なる2燃料を用いて理想的なサイクルの実現を図った。すなわち、予混合用燃料としてアンチノック性の高いイソオクタン、着火源となる直噴燃料として軽油の2燃料を用いることで、最大限の均一希薄化を図りつつ安定した着火制御を行うことが期待できる。これについて実験用単気筒ディーゼル機関を用いて燃焼および排出ガス挙動につい

て解析を行うとともに、単純化した数値計算により、均一希薄化の効果の解析を行った。

次に先に得られた、均一予混合圧縮着火による低NO<sub>x</sub>、低黒煙排出レベルをさらに広い運転範囲で確保することをねらいとして、予混合燃料として用いたイソオクタンにノルマルヘプタン(燃料の圧縮自己着火性の指標であるオクタン価はこの両者の混合比により決定される)を混合し自己着火性を変化させて実験的検討を実施した。また、これらの低エミッション化が実現した条件における燃焼挙動の撮影を行い、その要因の解析を行った。

次の段階では、実用面を考慮して単一燃料による予混合圧縮着火燃焼の可能性を追求し、軽油のみの運転を行った。しかし、軽油予混合時には予混合気が圧縮上死点以前に早期自己着火が発生するため、高負荷における大幅なエミッション改善は困難なことが分かった。そこで現状のディーゼル燃焼のエミッション改善方策手法を予混合圧縮着火方式にも適用し、さらなるエミッション低減を試みた。また、軽油予混合時のエミッション改善効果をより現実的な形で定量化するために、13モードで運転される負荷率およびエンジン回転数にあわせた条件における、通常のディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼の比較実験を行った。

最後に軽油を、予混合圧縮着火に適した燃料に改質する可能性としてMTBEに着目した。MTBEはアンチノック性が高く、酸素を含有することから、軽油と混合することで自己着火抑制に有効であることに加え、予混合圧縮着火方式の一つの問題である未燃燃料の酸化促進が期待される。したがって、MTBEを軽油に添加した場合の燃焼およびエミッション挙動を実験的に解析した。

これらの結果からディーゼル機関の広範な運転条件下において、予混合圧縮着火方式による低公害化の可能性および実用化に向けた課題を明らかにした。

#### 4. 実験装置および実験条件

##### 4.1. エンジンおよび吸・排気系

供試機関として表1に示す諸元の4サイクル直接噴射式単気筒ディーゼル機関を用いた。本機関は吸気管に予混合気形成用の燃料噴射系を増設した他に、燃焼室や噴射系等の改造は行っており、燃焼室形状はトロイダル型である。また、図3に実験装置全体の構成を示す。

吸排気系についてはエミッション改善方策を併用する一部条件のために、排気再循環(EGR)ラインと過給装置を装着した。吸気管内の予混合燃料噴射前に水冷式の熱交換機を設置し、EGRおよび加給時においても吸気温度は常に一定になる

表1 供試機関諸元

Engine Type	Single cylinder, 4 cycle
Combustion Method	Direct Injection
Bore / Stroke mm	85 / 92
Displacement ml	522
Compression Ratio	20.4
Pump Type	Bosch in-line + High Pressure Electronic Fuel Injector
Injection Nozzle Diameter mm	0.21
Number of Injection Hole	4

ように調節した。

##### 4.2. 燃料供給系

均一予混合圧縮着火のコンセプトを実現するため、通常のディーゼル機関で用いる噴射系に加えて、予混合気を形成するために、ガソリン機関用インジェクタを用いた吸気管燃料噴射系を新たに試作・追加した。このインジェクタは吸気弁より約40cm離れた吸気マニホールドに取り付けた。インジェクタは揮発性の高いイソオクタン等を用いた場合には噴射圧力0.4MPaのEFI用インジェクタを用いたが、軽油予混合時には燃料噴霧の蒸発を促進するため噴射圧力5Mpaの直接噴射ガソリン機関用の蓄圧式スワールインジェクタを用いた。これにより2系統の燃料供給が行われることから、以後、気筒内に直接噴射される燃料を直噴燃料、吸気管内に噴射される燃料を予混合燃料という。

直噴燃料系については、電子制御式ポッシュ列型ポンプと供試機関の標準である噴孔径0.21mm、4噴孔の噴射ノズルを用

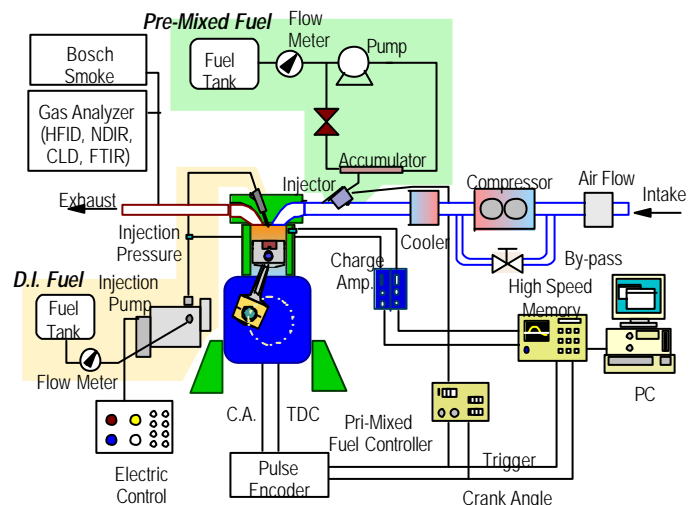


図3 実験装置構成図

いた。ノズル開弁圧力は18MPaである。

#### 4.3. 使用燃料

予混合燃料として、まず理想的な予混合圧縮着火を実現するため、自己着火しにくい燃料として、オクタン価100の基準燃料であるイソオクタン(2,2,4-トリメチルペンタン)を用いた。予混合燃料の自己着火性をパラメータとする際には、これにオクタン価0の基準燃料であるノルマルヘプタンを混合し、オクタン価を変化させた。このときの直噴燃料には通常のJIS 2号軽油を用い、着火性を確保した。

次に単一燃料での予混合圧縮着火を試みた条件では、予混合および直噴燃料ともにJIS 2号軽油を用いた。

また、JIS 2号軽油を予混合圧縮着火燃焼に適した燃料に改質する試みとしてMTBE(メチル=ターシャリー=ブチル=エテル)を添加した実験を行った。MTBEはアンチノック性が高く酸素を含有していることから、従来燃料に添加することで、より予混合圧縮着火に適した燃料とすることができると予測される。実用面を考慮した場合、2系統の燃料を持つことは望ましくないことから、この場合においては予混合、直噴燃料ともに同一の燃料を供給している。

#### 4.4. 圧力および排出ガスの測定

気筒内圧力と直噴燃料の噴射管内圧力をピエゾ式圧力変換器により測定し、連続した30サイクルの平均値から熱発生率、気筒内平均温度等を算出し、燃焼解析を行った。

排出ガスの測定について、CO、CO<sub>2</sub>にはNDIR、NO<sub>x</sub>にはCLD、THCにはHFID(以上は、堀場製作所MEXA-7100)を用いた。実験結果において、特にNO<sub>x</sub>が低い値となったときについては、CLDの特性による誤差を考慮して一部FTIRによる検証を行ったが、特に大きな差は見られなかった。黒煙の測定には低濃度型ポッシュ式スモークメータ(司測研GSM-100)を使用した。PM排出量については、黒煙濃度より計算式<sup>1)</sup>を用いて算出した。

#### 4.5. 燃焼映像撮影

予混合圧縮着火の燃焼特性の解析を行うため、燃焼挙動の撮影を行った。燃焼映像は燃焼室斜め上方に設けた2つの穴の一方にエンドスコープ、他方にフラッシュバルブを差し込み、そのエンドスコープを通して得られたものである。このエンドスコープを通して見える視野を図4に示す。エンドスコープで捉えられた映像は光学的リンクを経て高速度ビデオカメラ(フォトロン社)で撮影され、画像メモリに保存される。撮影速度は13,500fpsとした。この撮影速度は撮影条件時の1,500rpmでは10.A.あたり1.5コマとなる。また、フラッ

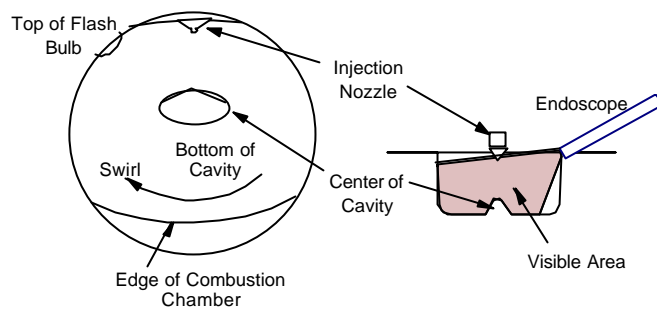


図4 エンドスコープを用いた燃焼写真撮影時の視野

シュとカメラとの同期はカメラコントロールユニットにて行う。カメラコントロールユニットにより任意の燃焼上死点信号を元にカメラをスタートさせ、その後、一定の遅れをかけてフラッシュを閃光させることで、噴射開始直後から燃焼に至るまでの噴霧の挙動についても撮影を行った。

また、平成10年度より、カラーCCDカメラを用いた撮影装置(AVL社513型)を導入し、軽油予混合条件の一部で燃焼観察に用いた。カラーCCDカメラでは現在、燃焼挙動の観察に適したレベルの高速なものは存在せず、この装置においてはサイクル毎に異なるクランク角の挙動を撮影することで擬似的に連続した現象を把握することができる。この装置を用いた場合には、これまで撮影不可能であった予混合燃焼の一部

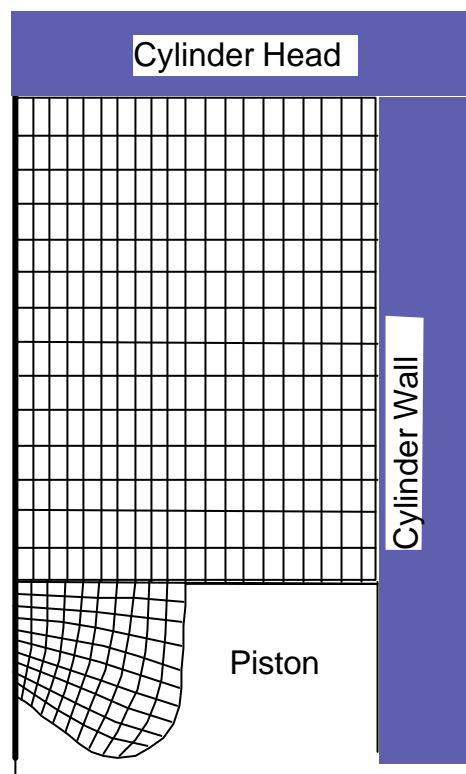


図5 数値計算に用いたメッシュ

の映像を得ることが可能となり、着火および燃焼現象の解析に有効性を発揮した。

#### 4.6. 数値シミュレーション

予混合圧縮着火のエミッション改善要因について解析するために、イソオクタン予混合時の一部の条件についてであるが数値シミュレーションを行った。計算にはKIVA-2コード<sup>12)</sup>を用い、2次元軸対象モデルとした。計算セルの数は半径方向に21、軸方向は初期状態(90deg.BTDC)で26とした。計算メッシュを図4に示す。噴射ノズルの位置は図のメッシュの左上になる。燃焼時の化学反応についてはArrhenius型反応速度に従うものとし、NOxについてはNOのみを考慮してその生成はZeldovich機構によるものとして計算を行った。反応モデル等の改造は行っていない基礎的なレベルでのシミュレーションであることから、燃焼生成物等の定量的な値を求めるには十分とはいえないが、ある限られた条件における定性的傾向はつかめるものと考えた。

#### 4.7. 実験条件

運転状態は定常とし、機関回転速度は1500rpm、負荷率はスモークリミットによる全負荷トルクを設定し、それを基準に負荷率を変化させた。その全負荷時における空気過剰率は予混合を行わない場合で、約1.6であった。吸気温度は、EGRを行う場合も含め、予混合燃料が噴射される直前で20一定としたが、イソオクタン等揮発性の高い燃料の噴射が行われた場合、気化熱により吸気マニホールド内で吸気温度の低下が見られた。

パラメータとしては、まず、予混合圧縮着火の基本的特性を把握するため予混合燃料の総燃料供給量に対する発熱量割合(以下、「予混合燃料割合」という)を用いて予混合化の影響を測定した。他に性能およびエミッション改善の試みとして予混合燃料の自己着火性、EGR率、直噴燃料噴射時期および過給圧力等を変化させて実験を行った。自己着火性の指標にはリサーチオクタン価を用いた。直噴燃料供給について、噴射時期は通常のディーゼル燃焼時の最適値である上死点前10deg.CAを基準とした。なお、吸気予混合を行わない通常のディーゼル燃焼の場合をベースとし、他の条件との比較を行った。

### 5. 実験結果および考察

予混合圧縮着火では、着火前の予混合気の状態が燃焼及びエミッションに直接的に影響を及ぼす。しかしながら、予混合燃料の分解、あるいは着火などの現象が起こる温度、圧力等

の条件は使用燃料の物性によりほぼ決定される。このように使用燃料が燃焼サイクルに極めて大きな影響を持つこととなったため、予混合燃料により分類して結果を記述し、考察していく。

#### 5.1. イソオクタン予混合時の燃焼および排出ガス挙動

##### 5.1.1. 均一化による燃焼および排出ガスへの影響

図6は予混合燃料にイソオクタンを使用したときの、負荷率75%における予混合燃料割合とNOx、黒煙排出濃度の関係を示したものである。まず破線で示した黒煙排出については、予混合燃料割合の増加とともにほぼ横這いか、やや増加する場合も見られる。しかし、予混合燃料割合が80%を超えるあたりから急激に低減し、予混合燃料割合90%でほぼ半分になる。さらに予

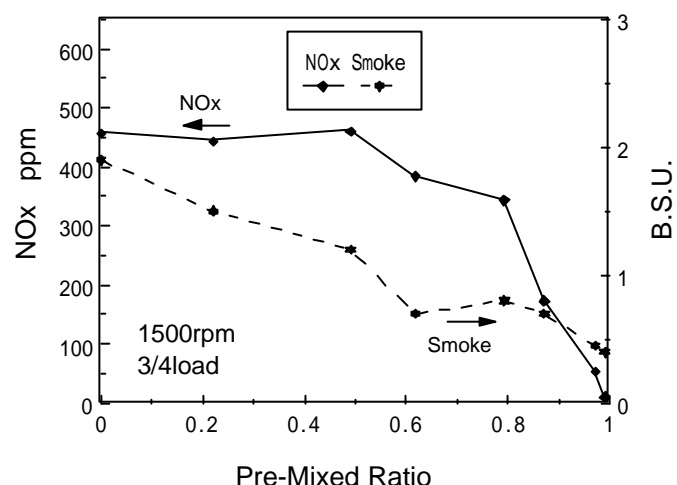


図6 予混合燃料割合によるNOxおよび黒煙排出挙動

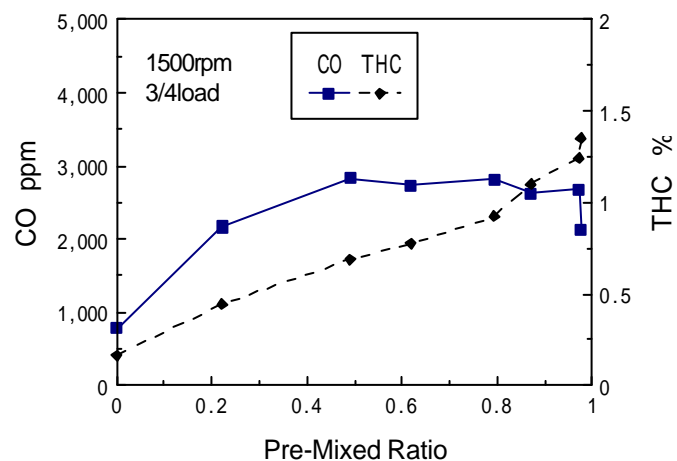


図7 予混合燃料割合によるCO、およびTHC排出挙動

混合燃料割合を高くした予混合燃料割合99%付近では軽油による着火制御が不安定になり、最大圧力値等のサイクル変動がやや大きくなるが、NOx 排出レベルは10 ~ 40ppm 程度にまで低減した。これは直噴燃料噴射量が少なくなり燃料噴霧近傍の燃料過剰状態がほぼ解消され、燃焼室全体で希薄燃焼が行われることによると考えられる。このような燃焼が行われた場合においても、燃費率の変化は小さく（燃費率については後述）燃焼が悪化することによりNOx 排出が低減したわけではない。このことから希薄予混合気の燃焼は、通常の気筒内に噴射された燃料が燃焼する場合と比較して、抜本的に異なる燃焼をしているものと推測される。

図7には予混合燃料割合とCO、THCの排出量の関係を示す。この図よりCO、THC 排出量は、ともに予混合燃料割合の増加に伴い増加する。しかし、COについては予混合燃料割合50%以上ではほぼ頭打ちとなる。これらの増加原因は、予混合気が燃焼室壁面付近やトップクリアランス部分で部分酸化したり燃え残りが生ずるためと考えられる。特にHCの抑制には燃焼室形状や空気流動等を改善することで、予混合気を消炎領域に入れないことがTHCの抑制に必要と思われる。

図8に気筒内圧力、熱発生率および質量燃焼割合を、各予混合燃料割合で比較した結果を示す。細い破線で示した予混合燃料割合40%においては予混合を行わないベース条件と比較して着火遅れが小さくなり、予混合燃焼期の熱発生率の最大値が低下している。直噴燃料噴射時に既に予混合気が形成されていることから、ベース条件よりも早期に可燃状態になるため、着火遅れが小さくなると考えられる。しかし、予混合気が希薄であるため、急激な予混合燃焼が行われるには不十分な状態であり、熱発生率の立ち上がりは、短い着火遅れ以前に噴射された少量の直噴燃料によるものと考えられる。このように予混合燃料割合50%以下では、直噴燃料の燃焼影響が大きく、これがNOx 排出濃度がほとんど変化しない結果につながったと考えられる。一方、黒煙排出量は拡散燃焼期とみられる部分が抑制され早期に燃焼が終了することと、気筒内噴射量が減少したことにより、局所的な燃料過剰状態がやや緩和されて低減したものと考えられる。

細い実線で示した予混合燃料割合が88%の場合、直噴燃料噴射量が少量となるため着火遅れは逆に大きくなり、ベース条件に近い値となる。そして小さなピークの後に急激な立ち上がりがあることから、直噴燃料が着火源となり、それが均一予混合気に燃え広がることを示しており、目的とした予混合圧縮着火の概念がほぼ実現した形の燃焼といえる。この予混合燃料割合では十分な濃度の予混合気が形成されていることから、わずかな燃料噴射で活発な予混合燃焼が行われている。通常のディーゼル燃焼において急激な予混合燃焼が行われた場合には

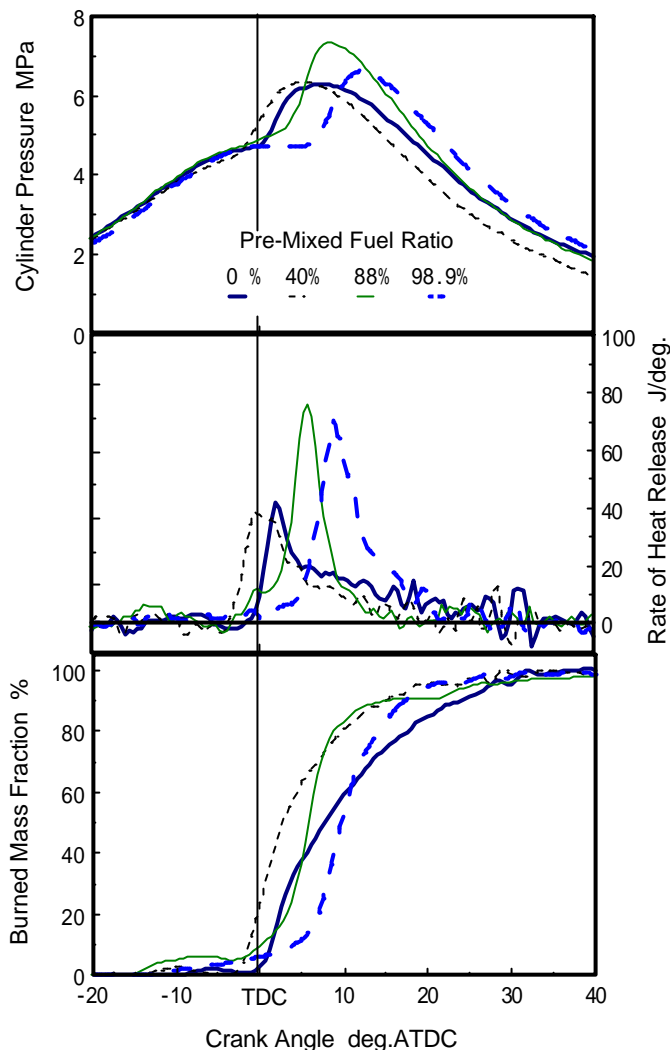


図8 通常のディーゼル燃焼および予混合圧縮着火時の気筒内圧力、熱発生率および質量燃焼割合

NOxは増大するといわれるが、この条件においてNOx 排出濃度はベース条件の半分以下になっている。これは先に述べた燃焼室全体が均一希薄状態であることに加え、ベース条件では予混合燃焼後の高温状態で拡散燃焼が行われるのに対して、予混合燃料割合が高い場合には拡散燃焼部分がほとんどなく、高温下での燃焼時間が短いことが、このような結果につながったと考えられる。

さらにNOxが極度に低い値を示した予混合燃料割合98.9%の場合（太い破線）には、着火源となる直噴燃料が極めて少ないため、軽油が着火してから、予混合燃料に着火するまでの遅れ期間がやや大きくなっている。予混合燃焼部分における挙動は予混合燃料割合88%時とほぼ同様に活発なものと考えられるが、着火時期や最大圧力値にばらつきがみられたために、平均してみると見かけの熱発生率の最大値は低くなり燃焼期間もやや長くなったものと考えられる。しかし、予混合88%時



よりもNOx 排出濃度が急激に低減したことは、これらの熱発生率の差異から低減要因を考えることは困難で、燃焼そのものの形態が変化している可能性がある。そこで、このようにNOx 排出量が50ppm 未満になる条件における燃焼を以後、低NOx 燃焼と呼ぶ。

予混合燃料割合 88 および 98.9%の熱発生率においては上死点前 15deg. CA 付近において熱発生率の小さな立ち上がりがある。この時期は直噴燃料の噴射時期よりもやや前になり、噴射ノズルから噴射された燃料が周囲に火炎の存在しない雰囲気下で瞬時に着火するとは考えにくく、混合気を圧縮した場合に観察される冷炎(cool flame)反応によるものと考えられる。

図9に予混合燃料割合による図示燃料消費率(I. S. F. C.)を示す。予混合燃料割合が50%以下では燃焼が緩慢になることから燃費率はやや悪化し、また低NOx 燃焼時にも、燃焼開始が遅れ、またはサイクル変動がやや大きくなることからわずかに悪化がみられた。それ以外の予混合燃料割合 60 ~ 88%においてはベース状態と比較して同等かわずかに改善される結果を示した。これは予混合燃料割合が高い場合には、供給した燃料のうち未燃HCとして排出される割合が高くなるのが悪化要因となるが、一方、燃焼反応が急速に行われるため、サイクルの等容度が高くなるのが改善要因となり、このような結果になったと考えられる。

### 5.1.2. 数値シミュレーションを用いた排出ガス低減要因の解析

上記の結果のNOx 排出傾向について、数値シミュレーションとの比較を行った。その結果得られた予混合燃料割合に対するNOx の排出傾向を図10に示す。この図より、数値シミュレーションによるNOx 排出傾向は、やや実験値と乖離している部分はあるものの、予混合燃料割合の低い部分においてはほとんど改善効果は見られないのに対して、予混合燃料割合が90%以上の領域においては劇的に減少する傾向については、実験値とほぼ一致した。このことから、予混合燃料割合が90%以上の場合のNOx 低減要因について数値シミュレーションによる解析を行うことは、予測としてある程度有効であると考えた。

図11は数値計算により求めた気筒内のNO 生成濃度、温度そして酸素濃度の分布を示したものである。図の上死点ではほぼ着火開始時期、上死点後 5deg. ATDC は予混合燃焼時期、そして同 10deg. ATDC はベース状態では拡散燃焼時、予混合圧縮着火では予混合燃料による燃焼の後期に相当する。まず、NO 濃度をみるとベース状態では燃料噴霧近傍の領域で多量に生成されるのに対し、予混合圧縮着火燃焼時には噴射ノズル近傍で少量の直噴燃料により少量のNO が生成されるものの、燃

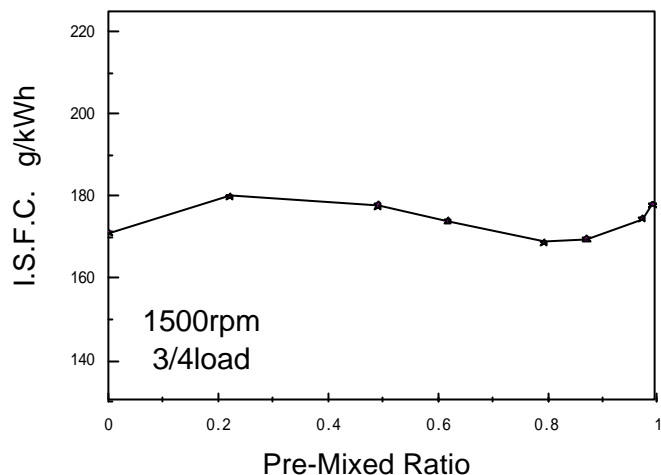


図9 予混合燃料割合による図示燃費率変化

焼室内の大部分の領域では大幅に低減していることがわかる。その要因として、中段の温度分布をみると、ベース状態では、燃焼室下部やトップクリアランス部ではほとんど燃焼が行われず、噴霧近傍のみが高温状態となるのに対して、予混合圧縮着火時にはより均一な燃焼となるために、高温領域は拡大するものの、最高温度は低下している。NO の生成は高温になると急激に増大することから、このような最高温度の低下がNO の飛躍的な低減につながったと考えられる。下段に示した酸素濃度分布は、希薄化が行われた指標となる。すなわち、噴霧近傍では燃焼により急激に酸素が消費され、一時的に酸素不足の状態になる一方で、予混合圧縮着火では酸素量の低下は緩やかで燃焼室全体で空気過剰の希薄燃焼が行われたことを示している。このことが黒煙の低減に大きく寄与していると考えられる。

この均一希薄燃焼の実現に近づいていることを示す一例として、噴霧近傍の酸素密度の履歴を数値計算により定量化したの

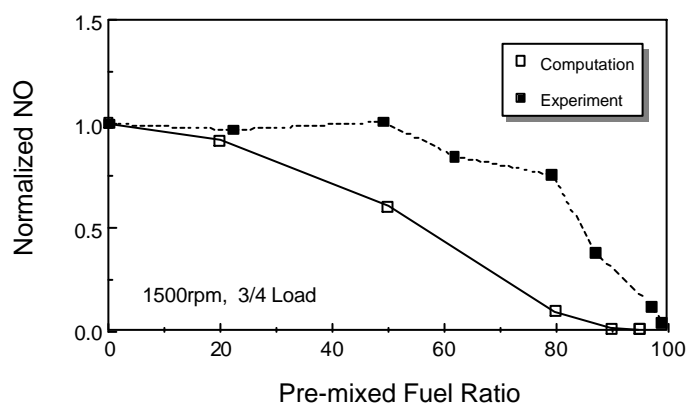


図10 予混合燃料割合によるNOx 排出量の実験値と計算値の比較

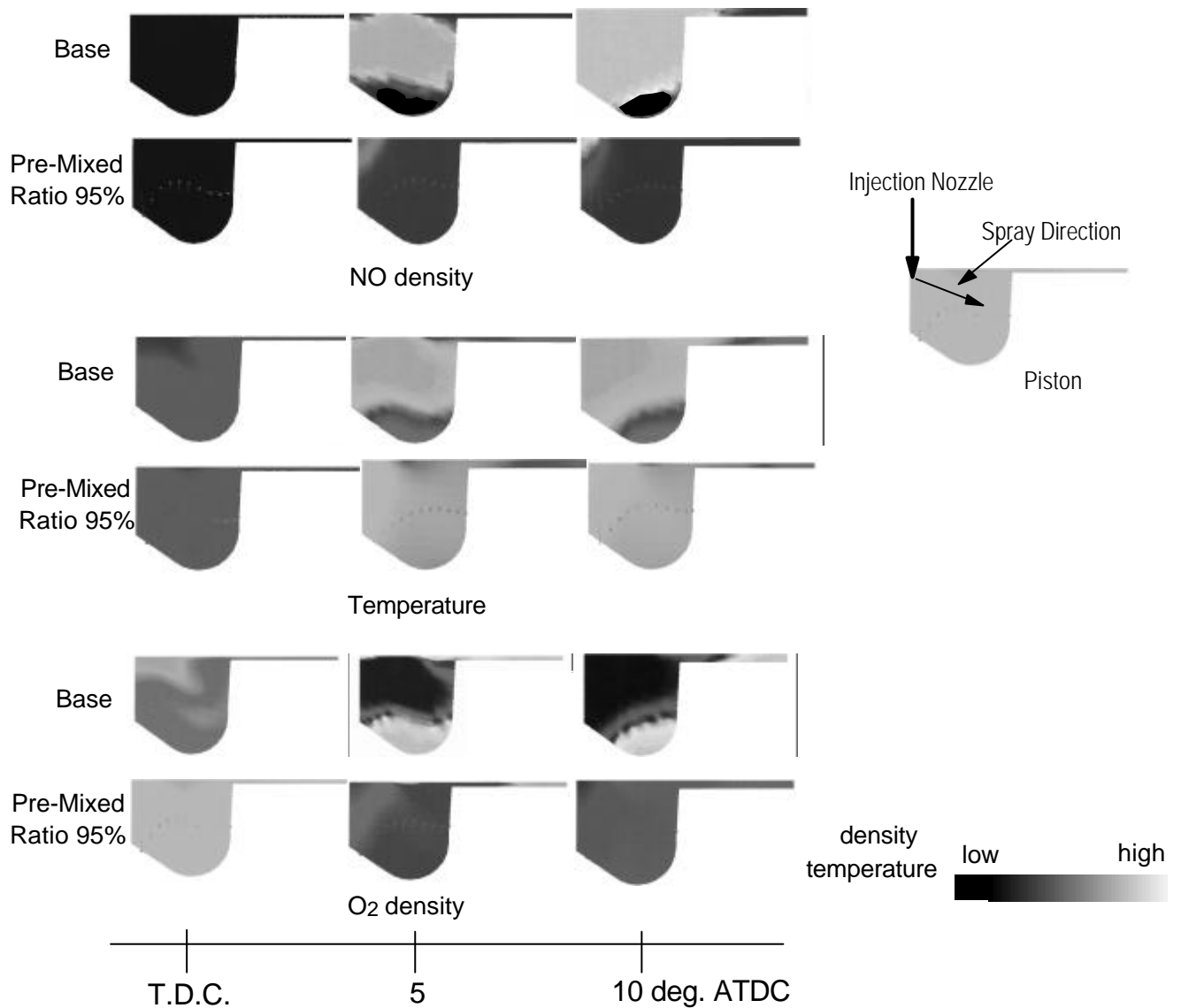


図 11 数値計算より求めた気筒内のNOx 生成、温度および酸素濃度分布

が、図 12 である。点線で示した通常のディーゼル燃焼では、燃料噴射直後には燃料噴霧が周囲の空気を取り込むために、酸素密度は一時的に予混合圧縮着火の場合を上回るが、燃焼が行われると前述のようにその部分の酸素は使用し尽くされて、一時的に欠乏状態になっている。このことから、噴霧近傍は燃料過剰状態であることがわかる。それに対して、実線で示した予混合圧縮着火時には噴霧近傍においても燃焼後に至るまで、十分な量の酸素が存在しており、噴霧近傍で酸素過剰状態を維持しつつ燃焼が行われることを示唆している。

以上のことから、高予混合割合において、理想的な予混合圧縮着火燃焼が実現できれば、NOx と黒煙の大幅な同時低減が達成できることが分かった。

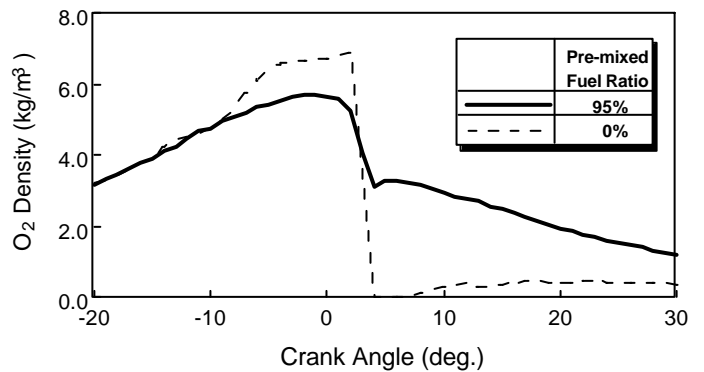


図 12 ディーゼル燃焼と予混合圧縮着火の数値計算より求めた燃料噴霧近傍の酸素濃度分布比較

### 5.1.3. EGRの適用

前述の、少ない黒煙排出でNOx排出濃度が50ppm以下となる低NOx燃焼は、抜本的なエミッション改善に向けて大きなポテンシャルを有するが、負荷変動の激しい自動車用機関に用いるには安定した着火制御が行えることが望ましい。そこで、予混合燃料割合を低NOx燃焼時ほど高くせず、直噴燃料による着火制御性を確保した上で、EGRを併用することにより低NOx燃焼レベルのNOx低減効果が得られるか否かについて実験的検討を行った。

負荷率75%における、予混合燃料割合に対する各EGR率でのNOx排出挙動を図13に示す。EGRを行うとベースでのNOx排出濃度は低下するが、予混合燃料割合が50%を超えるあたりからNOxが急激に減少し始める傾向はEGRの有無、EGR率の違いに関わらず同様に認められる。また、EGR率を高くすると、失火やノッキングのない安定した燃焼が得られる予混合燃料割合の最大値（以下、「最大安定予混合燃料割合」という）は次第に低下する。これはEGR率が高くなると給気混合気の一部がEGRガスで置換されるために給気酸素濃度が低下し、さらにCO<sub>2</sub>が増加することから圧縮温度も低下し、安定した着火制御を行うにはEGR無しの場合よりも強力な着火源が必要となるためと考えられる。

図14は、通常のディーゼル燃焼と予混合圧縮着火におけるEGRの効果について比較した図である。この図から、EGR率によるNOx低減率に関して、両者ともほとんど差異はなく、絶対的なNOx排出量が大きく低減する予混合圧縮着火においても、EGRにより通常のディーゼル機関と同様のNOx低減が可能であることがわかる。

一方、図15の黒煙排出濃度について、通常のディーゼル燃焼では、高負荷域においてEGRを行うと黒煙が急増し、実用上の大きな制約となる。しかし予混合圧縮着火では予混合燃料割合の増加とともに黒煙は減少し、予混合燃料割合が60%以上の領域では高いEGR率においても黒煙濃度は増加せず、EGR無しの場合と比較してむしろやや減少する傾向が認められた。

黒煙はリーン状態では生成が少なくリッチになると急激に増大する。そのため、リッチ領域が少なくない通常のディーゼル燃焼において、EGRを行うことにより全体がリッチ側に移行することは黒煙の増加要因となる。それに対して、ほとんどが均一希薄状態の予混合圧縮着火では、EGRによりややリッチサイドに移行しても黒煙が急増するレベルのリッチ状態になる領域は少ないと考えられる。このことから、予混合圧縮着火においては黒煙の悪化を招くことなく、EGRにより、高いNOx低減効果を発揮できるといえる。

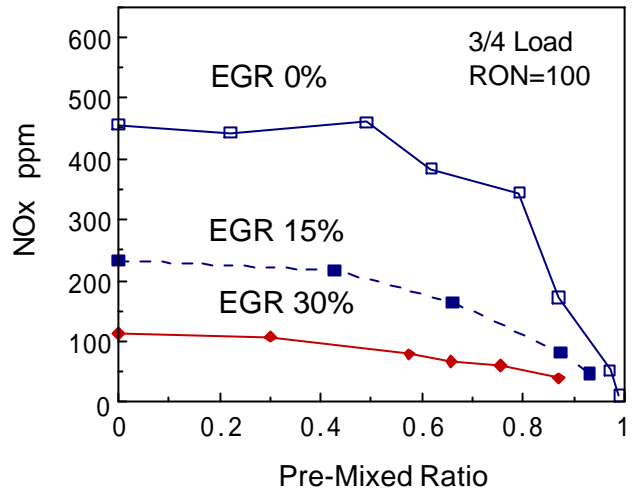


図13 EGR時の予混合燃料割合によるNOx排出濃度変化

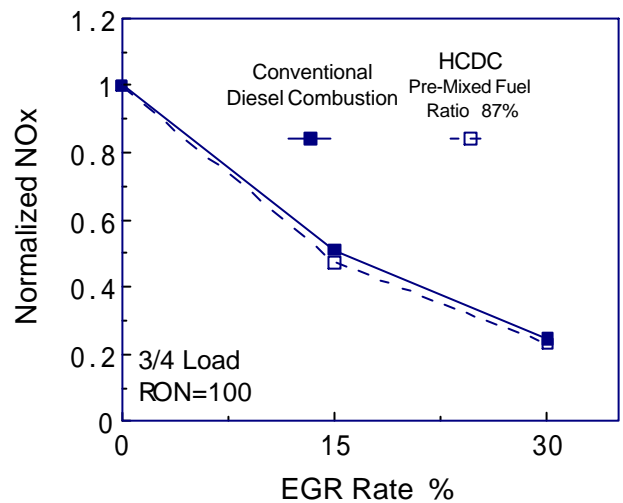


図14 ディーゼル燃焼と予混合圧縮着火時のEGR率によるNOx排出率変化

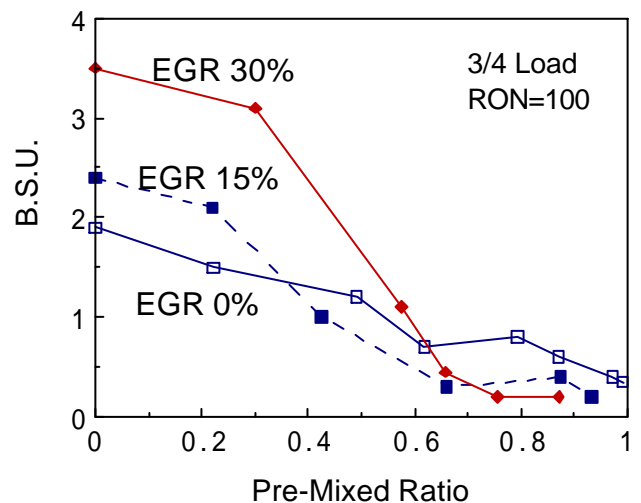


図15 EGR時の予混合燃料割合による黒煙排出濃度変化

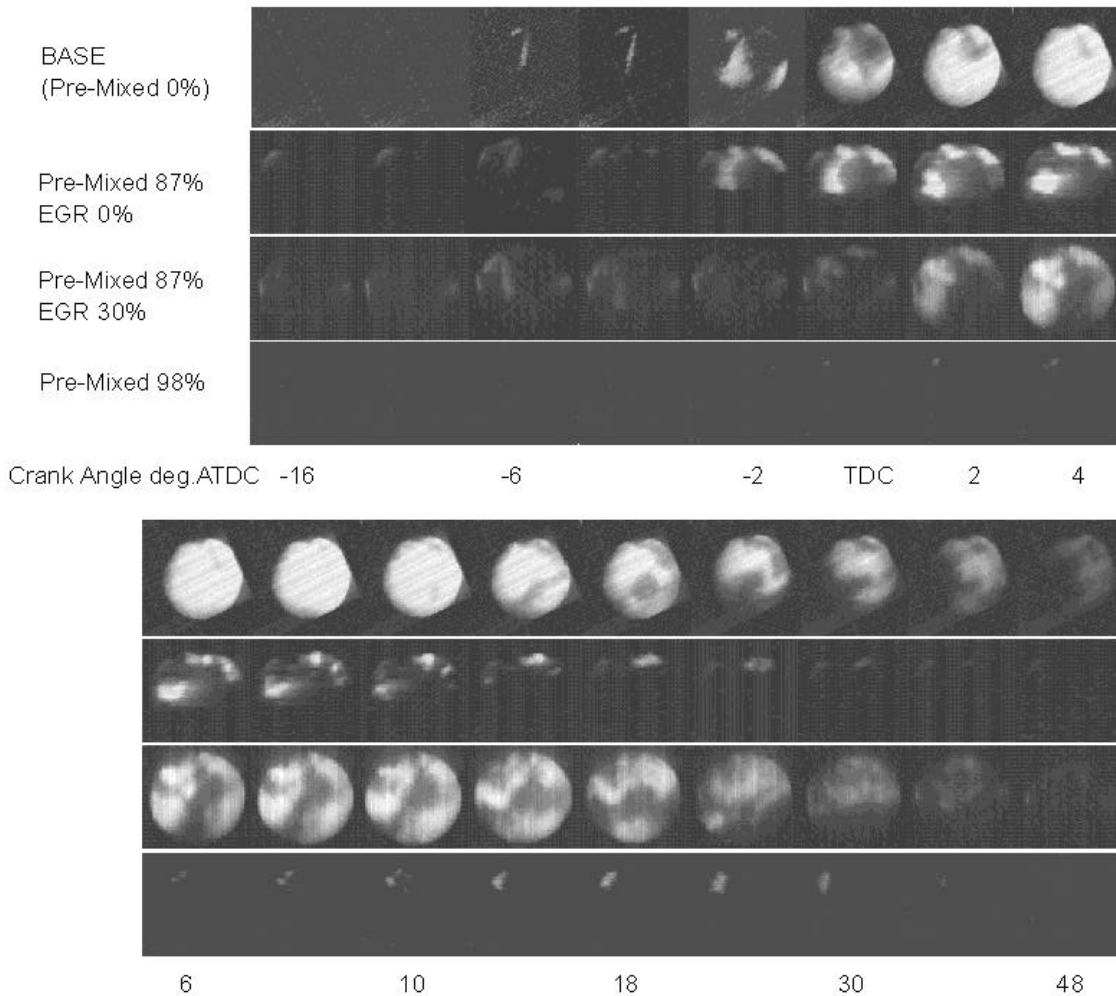
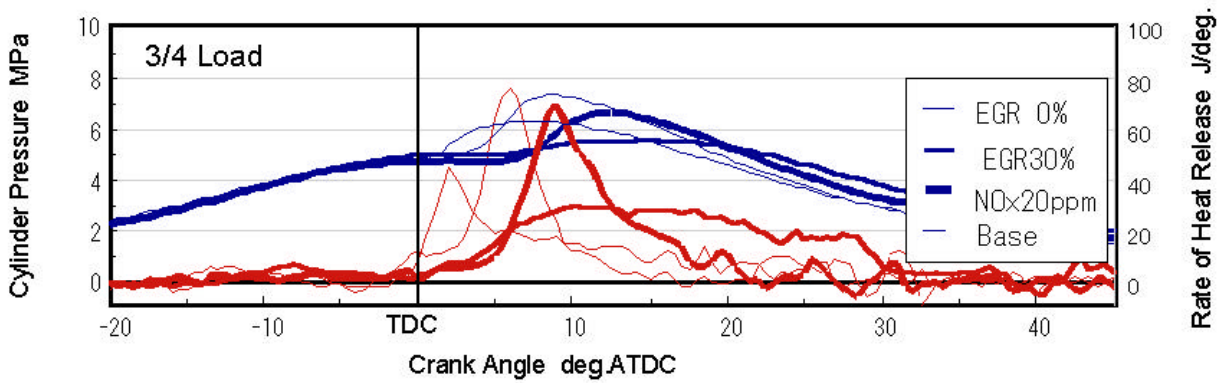


図16 各種条件における予混合圧縮着火燃焼の気筒内圧力および熱発生率変化と燃焼挙動写真

#### 5.1.4. 燃焼挙動の観察結果

図16に、負荷率3/4における、ベース条件、予混合燃料割合87%時のEGR無しおよびEGR30%、さらに低NO<sub>x</sub>燃焼時の、気筒内圧力、熱発生率及び燃焼過程の直接撮影結果を示す。まず、予混合を行わないベース条件においては、着火開始後、長期間にわたって燃焼室のほぼ全面に輝炎が広がりながら燃焼が行われる。それに対して予混合燃料割合が約98%である低NO<sub>x</sub>燃焼時には、ノズル近傍にわずかに直噴燃料の

燃焼と思われる輝炎が認められるのみである。しかしながらほぼ同等のトルクを発生していることから燃焼は行われているわけで、青炎と考えられる輝炎を発生しない燃焼であることがわかる。このような抜本的な燃焼の変化が排出ガス組成に大きな影響を与えていると考えられる。

予混合燃料割合87%では1割強の直噴燃料を噴射していることから、輝炎を発生しつつ燃焼が進行する様子が観察できるが、EGRの有無により燃焼挙動は異なる。EGR無しの場合、

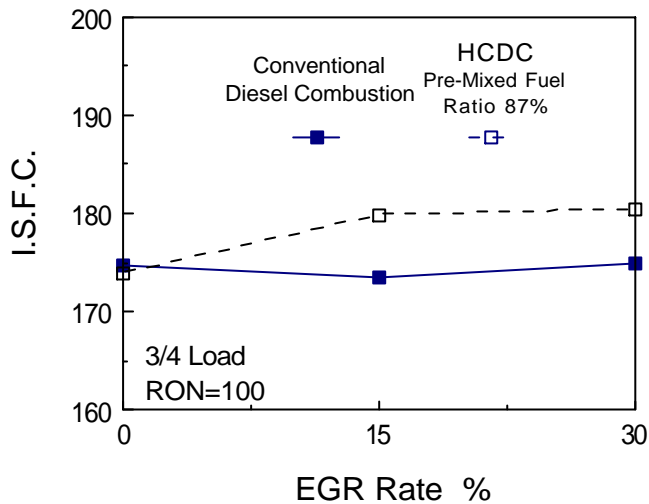


図 17 ディーゼル燃焼と予混合圧縮着火のEGR時の  
図示燃費率変化

輝炎は強い輝度を保ったままほとんど拡散しない。これは熱発生率からも明らかのように、着火遅れが小さいため直噴燃料は給気と十分混合しないまま燃焼が行われるためと考えられる。

一方、EGR率30%では、着火遅れが大きくなり着火後も緩慢な燃焼が持続することが熱発生率からも明らかである。燃焼写真によれば、輝炎は低い輝度で広く分布し、長く持続している。すなわち、着火遅れが大きくなることにより燃料噴霧と給気予混合気との混合が促進され、より均一化される。このため、EGRにより給気酸素量は減少するが、酸素利用率が向上するためにNOxのみならず黒煙の増大も抑止されるものと考えられる。しかしながら、このように直噴燃料が過度に拡散し希薄化されることは、着火源としての機能が低下することを意味し、酸素濃度の低下と併せて最大予混合燃料割合の低下をもたらす要因となったといえる。また、他の条件ではほぼ輝炎が消滅する30deg. ATDC以降においても輝炎が認められることから、明らかに燃焼が緩慢になっていることわかる。このため、図17に示す、EGR率による図示燃費率の変化をみると、予混合なしではEGRを行っても燃費率はほとんど変化しないのに対して、予混合87%ではEGR時に3~5%程度の悪化がみられた。

### 5.1.5. 負荷による着火制御性変化

予混合圧縮着火方式のねらいの一つは、広範な負荷領域において軽油による着火制御を行うことである。本方式では、前節までに示したように、予混合燃料割合を高めたほうが低エミッション化につながるが、過度に高くすると失火等をおこすことから各負荷領域において安定した着火制御を行うことが可能な予混合燃料割合の最大値（以下、「最大安定予混合燃料

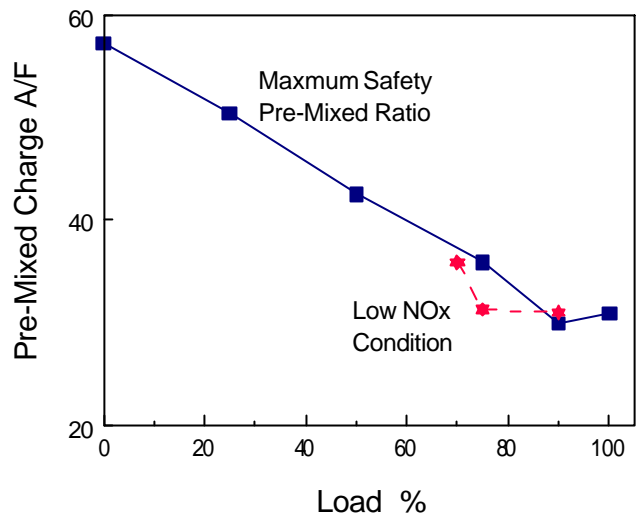


図 18 各負荷率に対する最大予混合燃料割合と低 NOx  
燃焼時の予混合気空燃比

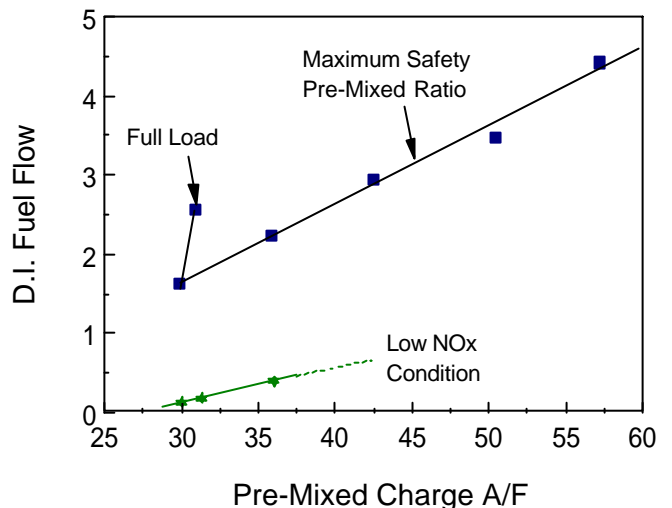


図 19 最大安定予混合燃料割合および低 NOx 燃焼時に  
おける予混合気空燃比に対する直噴燃料噴射量

割合」という。)が存在する。

図18にその最大安定予混合燃料割合および低NOx時の負荷に対する予混合気空燃比、図19にその予混合気空燃比に対する直噴燃料噴射量の関係を示す。図18から低負荷ほど予混合気空燃比が高いだけでなく、図19より直噴燃料噴射量も多いたことがわかり、予混合気空燃比の高い希薄な雰囲気下においてはより強力な着火源が要求されることがわかる。それに対して負荷率が高くなると、燃焼室内に十分な濃度の予混合気が形成されているため、直噴燃料単独では着火しないレベルの微少な噴射量でも着火源として有効に機能し、より均一希薄燃焼に近づき、排出ガスが大幅に改善される要因となっていると考えられる。一方、図18において75%負荷以上の領域では空燃比が28程度で頭打ちとなっている。これはこれ以上予混合燃料

割合を高め、空燃比を高くした場合にノッキングが発生したためである。したがって全負荷においては予混合燃料流量をほぼ等しくしたまま、直噴燃料を多くすることでトルクを増加させることとなったため、それ以下の負荷での傾向とは異なり、図19に示すように、この領域における直噴燃料は増加した。また、図18において低負荷においては最大安定予混合燃料割合を超えた予混合燃料割合にすると失火するサイクルがみられたが、負荷の高い領域では燃焼可能な範囲があった。この場合、直噴燃料が着火してから予混合気着火するまでの遅れが大きくなり、着火制御がやや不安定になった。それによりサイクル変動が大きくなる場合や、さらには些細な吸気条件等の変動によると考えられる急速な予混合燃焼とならない燃焼が行われる場合があるといった問題点が認められた。しかし、特に低NOx燃焼が実現したのは、この自己着火直前の領域であり、予混合燃料の自己着火性を変化させることで、広範な負荷領域で低NOx燃焼が実現できる可能性がある。

#### 5.1.6. 負荷による排出ガス挙動

ベース時および最大安定予混合燃料割合における、負荷によるNOxおよび黒煙排出挙動について図20、21に示す。この図より、各負荷領域においてNOx、黒煙ともに大幅に低減することができた。

まず、図20のNOxについてはすべての負荷領域において低減し、アイドル時から90%負荷までは排出濃度で半分以下となっている。全負荷では、それまで負荷とともに増加していた最大安定予混合燃料割合が下がったことによりNOx排出濃度がやや高い値となったが、依然としてベースよりは大きく低減した。また、図には低NOx燃焼時についても示してある。このような運転が可能な負荷領域は限られており、負荷率にして70~90%程度の範囲である。それを空燃比で表すと28~31程度の範囲となる。

次に、図21の黒煙排出についても、すべての負荷領域において大幅に低減する。全体的に低いレベルであるが、低減率はアイドル時と全負荷においてわずかながら他の負荷の場合よりも低い値となった。これは直噴燃料噴射量がアイドル時に最大であり、全負荷時もそれよりは少ないものの75~90%負荷の場合よりも多くなっていることから、直噴燃料噴射量がスモーク排出レベルに影響を与えていることが考えられる。また、低NOx燃焼時についてもスモーク排出濃度に関しては特に大きな変化はなく、同様の低減効果がみられ、広範な負荷率において予混合圧縮着火による大幅なエミッション改善効果を得られることがわかった。

#### 5.2. 予混合燃料のオクタン価変化による影響

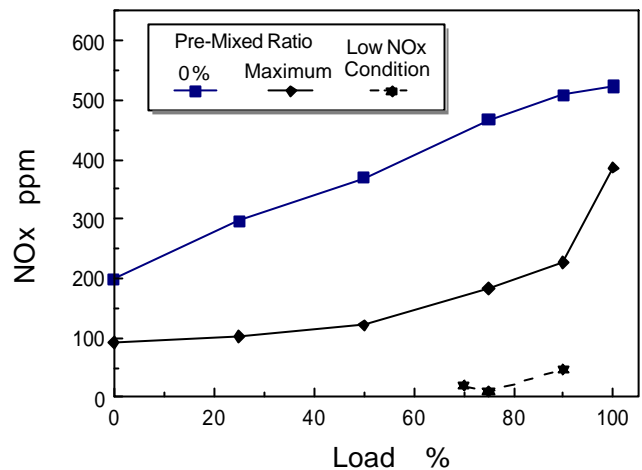


図20 ディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼における負荷率に対するNOx排出濃度比較

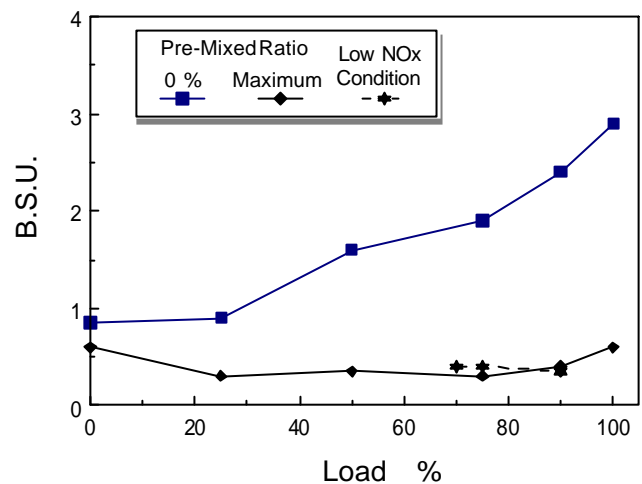


図21 ディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼における負荷率に対する黒煙排出濃度比較

前節では、直噴燃料による安定した着火性を確保する目的で、予混合燃料割合をやや抑えて低NOx燃焼にならない領域でのさらなるエミッション改善を試みたが、ここでは低NOx燃焼を広範な負荷領域で実現することを目指し、予混合燃料の自己着火性を変化させることで、低NOx燃焼領域の拡大を試みた。

#### 5.2.1. 排出ガス挙動解析

オクタン価100と75の予混合燃料を使用したときの予混合燃料割合とNOx、黒煙排出濃度の関係を図22、23に示す。各燃料において、負荷率を変化させたが、これは予混合燃料割合を95%以上に設定しても、失火やノッキングを生ずることなく低NOx燃焼が可能な負荷率が、オクタン価と共に変化

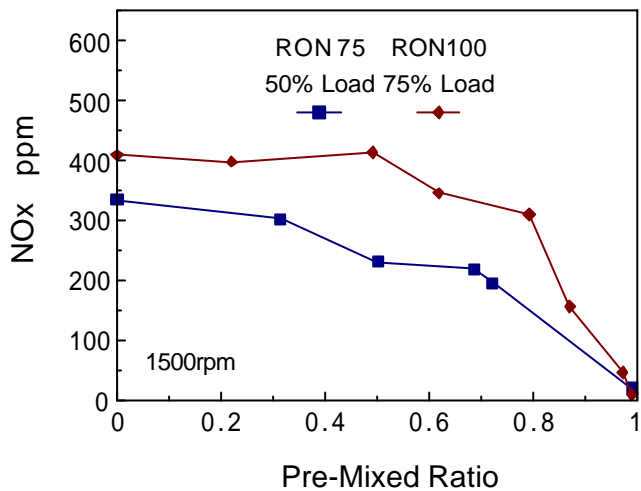


図22 予混合燃料のオクタン価の違いによる予混合燃料割合に対するNOx 排出濃度

するためである。そのため、ベース条件におけるエミッション値がやや異なるが、NOx、黒煙ともに予混合燃料割合の増加にともなってほぼ同様の低減効果がみられた。このことから、予混合燃料の揮発性や燃焼速度等に大きな差がない場合、オクタン価の違いによる排出傾向に違いはほとんどみられない。また、予混合燃料のオクタン価を変化させることで異なる負荷で、低NOx 燃焼が実現されたことから、予混合燃料の自己着火性を変化させることによって低NOx 燃焼が可能な運転領域が拡大できる可能性があるといえる。

### 5.2.2. 低NOx 燃焼運転領域の拡大効果

図24は、オクタン価の異なる燃料において低NOx 燃焼が実現した空燃比とそのときのNOx 排出濃度の関係を示している。オクタン価100においては、空燃比30前後のごく狭い領域のみで低NOx 燃焼がみられた。それに対し、オクタン価75あるいは50と自己着火性が高くなるほど、低NOx 燃焼が可能な空燃比の上限は希薄側に移行するものの、より広範な空燃比において低NOx 燃焼が実現された。さらに、低NOx 燃焼可能範囲が広がっただけでなく、低NOx 燃焼時の燃焼安定性もよく、オクタン価100で低NOx 燃焼が行われたときよりも気筒内圧力の最大値等のサイクル変動は小さかった。このことから予混合燃料の自己着火性が低NOx 燃焼の実現に大きな影響を持ち、オクタン価が低いほど広い空燃比範囲で低NOx 燃焼が可能であるといえる。また、各燃料において、NOx が最小となる空燃比が存在し、低NOx 燃焼を行うのにある最適な空燃比があることを示している。その最適な空燃比よりもリッチ側の場合にはロッキングに近づき、より急激な燃焼が行われるのに対して、リーン側では確実な着火を行うためにより多くの直噴燃料を噴射することになるため、局所的にリッチあ

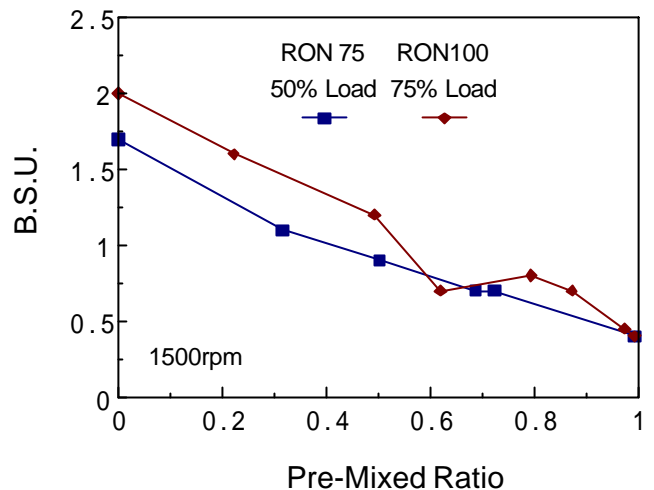


図23 予混合燃料のオクタン価の違いによる予混合燃料割合に対する黒煙排出濃度

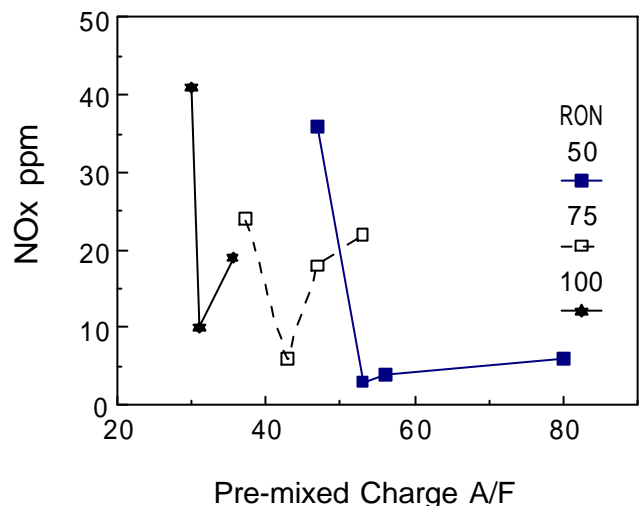


図24 オクタン価の違いによる低NOx 燃焼時の予混合気空燃比とそのときのNOx 排出濃度

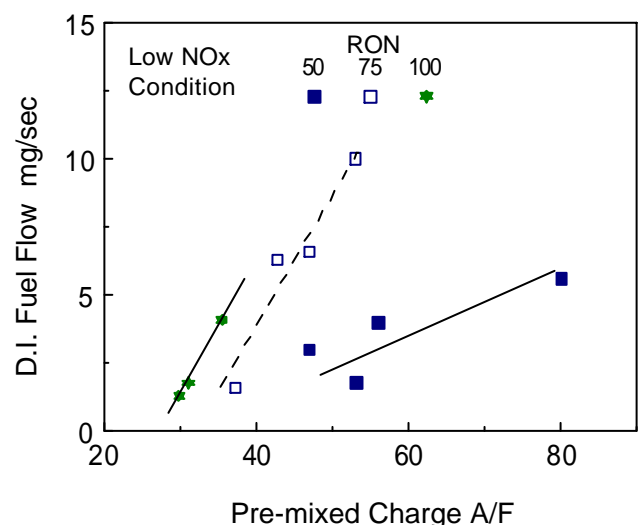


図25 低NOx 燃焼時の予混合気空燃比に対する直噴燃料流量

るいはストイキ領域が形成され、NOx の増加につながると考えられる。

図25に低NOx 燃焼時の予混合気空燃比と直噴燃料流量の関係を示す。既報で示したように、低NOx 燃焼の実現は着火用燃料を極力減らし、混合気の均一化を図ることにより得られる。また、予混合気空燃比が濃いほど少量の直噴燃料で着火が可能であるが、過早着火等により限界値が存在する。図24によれば、同一空燃比においては燃料の自己着火性が高いほど直噴燃料が少量でよいことを示している。このため予混合燃料の自己着火性が高いほど、低NOx 運転領域がリーン側で得られることになる。

以上のことから、予混合燃料の自己着火性を変化させることにより、低NOx 燃焼可能な負荷領域の拡大が可能であることが明らかとなった。

### 5.3. 軽油予混合時の燃焼および排出ガス挙動

前節までは、予混合燃料として単一成分の燃料であるイソオクタンおよび一部それにノルマルオクタンを加えた単純な性状の、いわば特殊な燃料を用いた。これらの燃料は予混合圧縮着火に適した特性は持っているが、一般に供するには適当でない上、自己着火性のよい直噴燃料として別途燃料を必要とするなど、実用面を考えると問題がある。そこでより実用性を高めるために、JIS 2号軽油のみを用いて予混合圧縮着火によるエミッション改善を試みた。

#### 5.3.1. 排出ガス挙動解析

各負荷率における予混合燃料割合とNOx、黒煙排出濃度の関係を図26に示す。まずNOxは、予混合を行うことでやや低減するものの、予混合燃料割合が80%以下においては、低減幅は比較的小さい。とりわけノッキングを回避するため予混合燃料割合の上限に制約のある高負荷域では特に改善幅が小さい。このように、予混合を行っても必ずしも高い低減効果が現れない要因としては、予混合化により燃料過剰領域は低減するものの、ある程度の直噴燃料が供給されている状態では、それらの一部が当量比近傍の混合気になり、NOx生成につながる当量比付近の混合気領域は必ずしも大きく低減していないものと考えられる。しかし、40%負荷において予混合燃料割合80%以上とした場合、NOxは急激に低減し、予混合燃料割合95%では20ppm程度となった。この条件では、直噴燃料噴射量が少なく、ほぼ燃焼室全体が均一希薄状態となり、イソオクタン予混合時にも見られた低NOx燃焼が実現したと考えられる。燃焼室のほぼ全域で希薄燃焼が行われるということは、従来のディーゼル燃焼とは抜本的に異なるものである。そのときの現象解析は後述する。

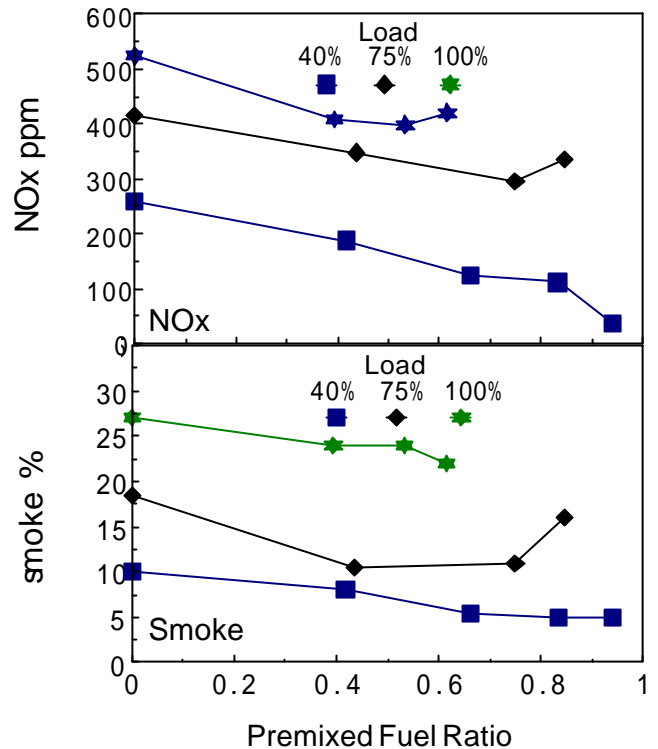


図26 軽油予混合時の各負荷率における予混合燃料割合に対するNOxおよび黒煙排出濃度

それに対して黒煙については、予混合燃料割合の増加にとともにほぼ一様に低減する。これは予混合燃料割合の増加とともに直噴燃料噴射量が減少し、局所的な燃料過剰状態が次第に解消され、その分空気利用率の向上が図られることが原因と考えられる。しかし、その低減幅はイソオクタンを予混合燃料としたときより小さい。島崎らは早期噴射による均一化を行った際、黒煙は低減するがSOFが増加し、PMとしてみると悪化した、としている。筆者らの実験においても、ろ紙にペースト状のものが付着したことから、ろ紙に捕集されるSOF分の影響により黒煙の低減効果が抑制されたと考えられる。なお、

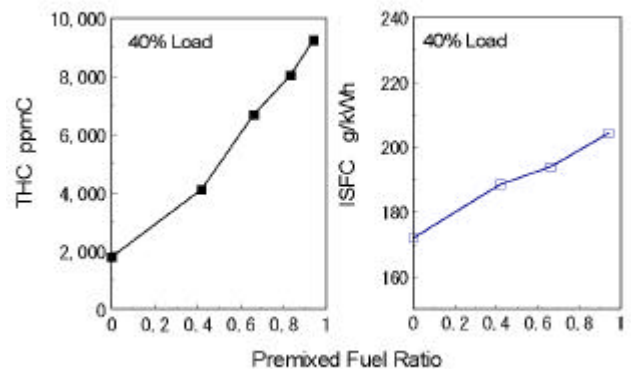


図27 40%および75%負荷率における予混合燃料割合に対するTHC排出濃度および図示燃費率



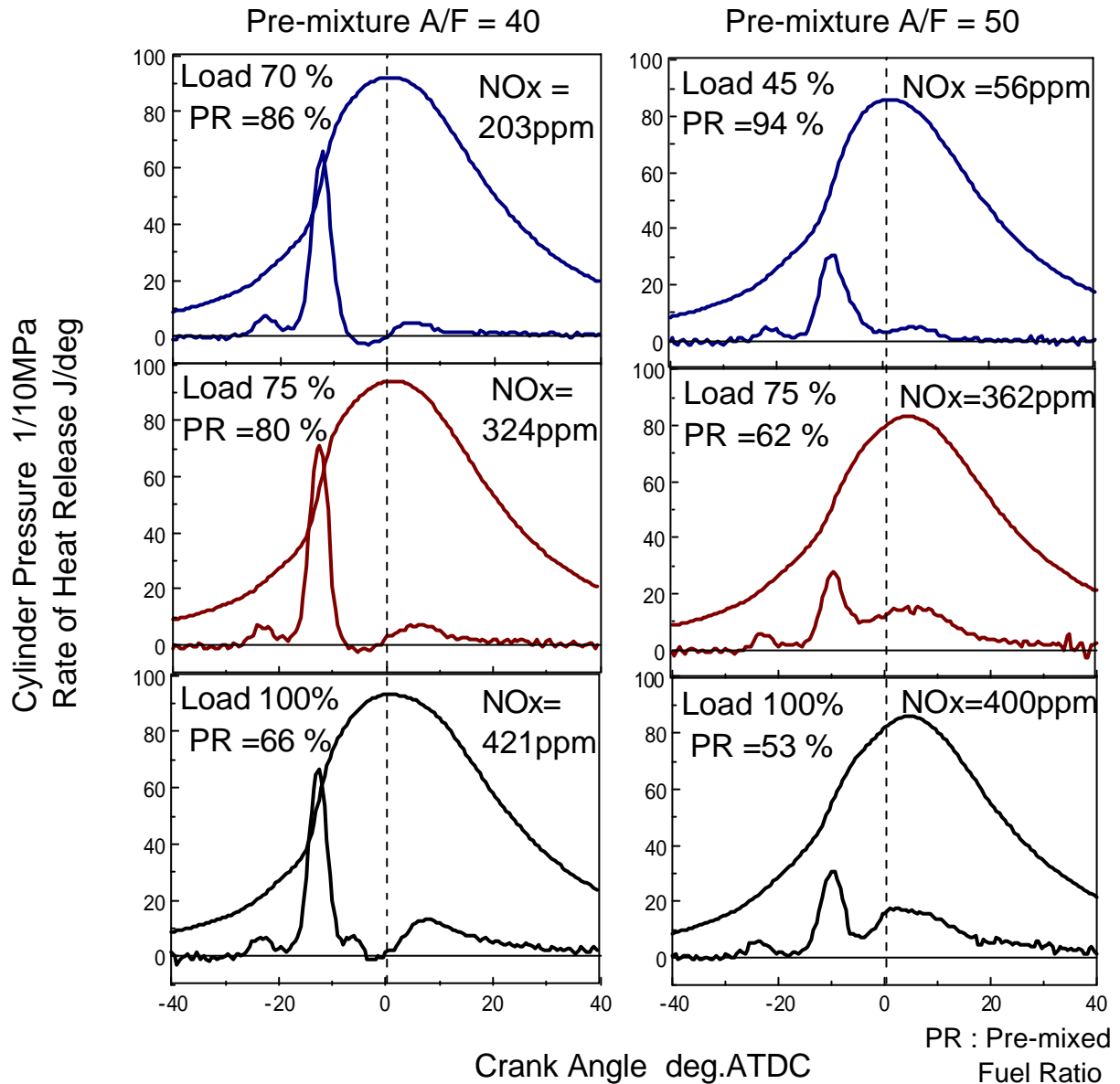


図28 予混合圧縮着火燃焼の予混合気空燃比40および50の場合の各負荷による気筒内圧力および熱発生率変化

NOx、黒煙ともにノッキング直前の条件では増加する場合も見られた。

図27に予混合燃料割合とTHC排出濃度および図示燃費率の関係を示す。この図よりTHC排出量は予混合燃料割合の増加にともない増加し、いずれの負荷においても高い排出レベルを示す。この増加要因としては、燃焼時に温度の上がりにくい燃焼室壁面付近やトップクリアランス部分で予混合気部分酸化や未燃のまま排出されることが考えられる。このような未燃燃料の排出は、前述のイソオクタン予混合時においても同様で、予混合圧縮着火の一つの大きな課題である。燃焼室形状や空気流動等を改善することで、予混合気を消炎領域に入れな

いことがTHCの抑制に必要と思われる。図示燃費率については、通常のディーゼル燃焼に対し、予混合燃料割合50%程度で約1割、80%付近では約2割の悪化が見られた。このような悪化の要因としては、すでに述べたように大量の未燃燃料が排出されることは一つの要因と考えられるが、イソオクタン予混合時には燃費率の変化は小さかったことから、主要因とはいえない。後述するように、燃焼開始が上死点よりかなり前に早まるなどの燃焼時期の問題が主要因と考えられる。

### 5.3.2. 燃焼挙動解析

予混合圧縮着火燃焼において予混合気空燃比は当然ながら、

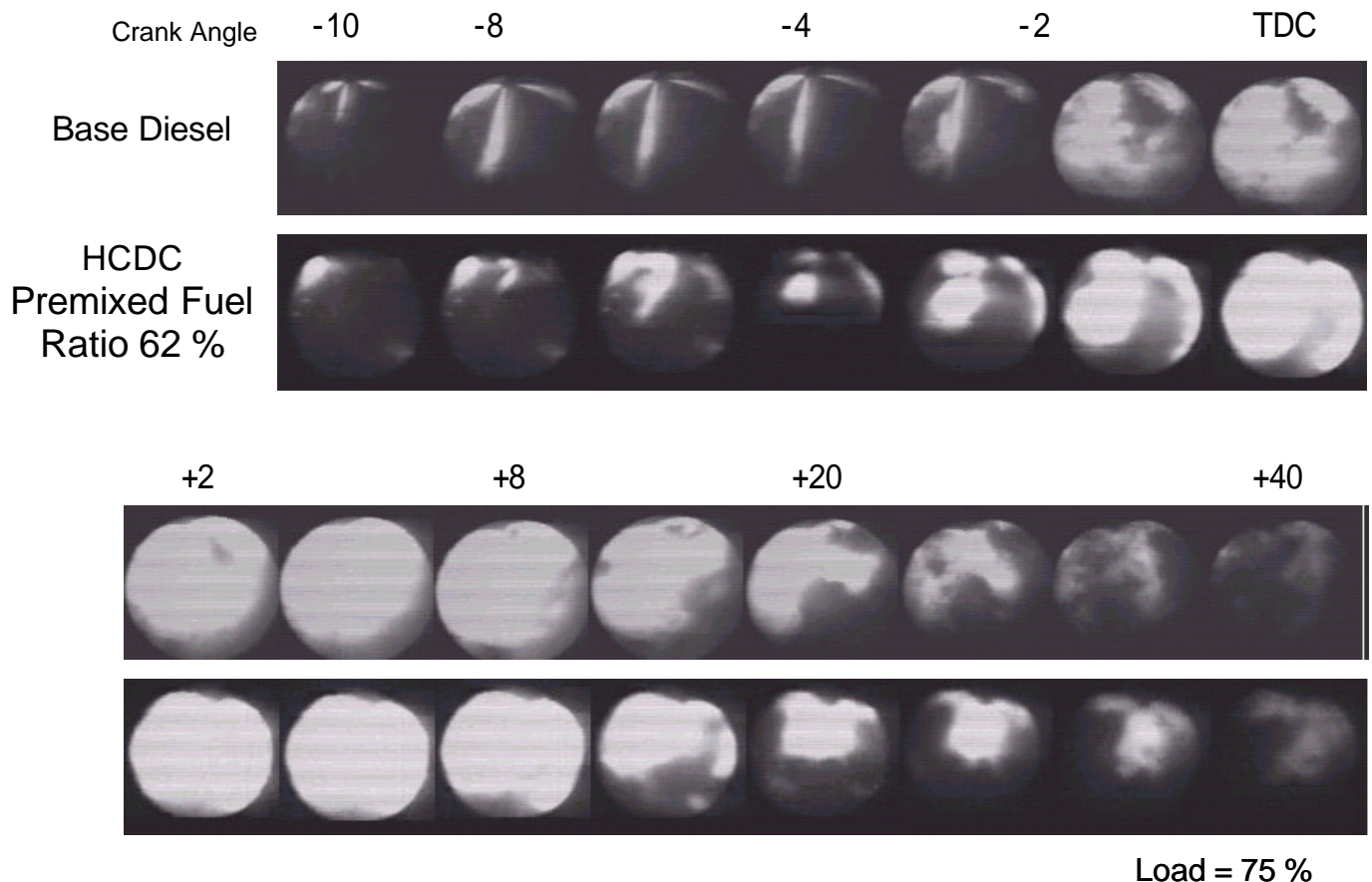


図29 燃焼写真によるディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼の燃焼挙動比較

燃焼に大きな影響を及ぼす。特に軽油予混合時には過早着火を起しやすいため、その影響は著しく大きい。図28は全負荷を含めた各負荷領域で、安定限界に近い予混合気空燃比40とそれより希薄な50の各場合において、負荷率が変化したときの気筒内圧力と熱発生率を比較したものである。図中75%負荷時においては同負荷のベース条件の気筒内圧力と熱発生率を加えてある。この図より、予混合気による燃焼、すなわち27deg. BTDC付近で開始される冷炎反応と考えられる小さな熱発生の上立ち上がり、それに続く大きなピークをもつ燃焼は、負荷率による差異がほとんど認められない。予混合気空燃比40の場合は、熱発生率の最大値より判定したノッキング限界に近い条件であるが、いずれの負荷においてもほぼ等しい最大値をとっていることから、ノッキング限界は予混合気空燃比に大きく依存しているといえる。

それに対して、着火開始時期は、予混合気空燃比によらず15deg. BTDC付近より開始され、10deg. BTDCでほぼ最大となり、すべての条件で違いがない。この燃焼開始時期は直噴燃料噴射時期よりもやや早い時期に開始されていることから、直噴燃料が気化して着火したとは考えにくく、予混合燃料が自

己着火したものといえる。このように各負荷条件において、予混合燃焼部分はほぼ同様であるにも関わらず、図28中に示したNOx排出濃度には大きな違いがみられる。予混合燃料割合が高く、より均一かつ希薄な燃焼が行われる場合のNOx排出濃度は低いことから、排出されるNOxの多くが直噴燃料の燃焼により発生すると考えられる。

一方、負荷により熱発生率に違いがみられる上死点以降は、直噴燃料による熱発生と考えられる。このことは直噴燃料が着火源としての機能を果たさず、予混合燃料のみでは不足する負荷を補うかたちとなったことを意味する。逆にこのように予混合気の燃焼と直噴燃料による燃焼を分離できたことが、急激な圧力上昇を回避しつつ全負荷運転を可能にしたといえる。

図29に負荷率75%時の予混合圧縮着火と通常のディーゼル燃焼における燃焼挙動の比較を示す。予混合圧縮着火において、今回の光学系では輝炎のみの映像であり、青炎は撮影されず、予混合気の自己着火に関する情報が得られていない。また、図中の着火後はフラッシュ光源が逆に輝炎を見にくくしていることから、フラッシュを行わないサイクルのものを示している。この図より、通常ディーゼル燃焼では2deg. BTDC

付近で着火が開始されるのに対して、予混合圧縮着火では 6deg. BTDC で輝炎が発生し始めており、直噴燃料の着火遅れが著しく小さくなっていることがわかる。図 28 の熱発生率においても、75% 負荷、予混合燃料割合 52% 時には 5deg. BTDC 付近で予混合気の燃焼が完全に終了しないうちに直噴燃料による拡散燃焼が開始されており、その時期は通常のディーゼル燃焼の熱発生以前であることと一致する。これは予混合気の燃焼が行われている高温の雰囲気中に噴霧が噴射されるため、燃料噴霧は空気を十分取り込む時間がないまま燃焼すると考えられる。このため、予混合圧縮着火では直噴燃料噴射量は半分以下に減少しているにもかかわらず、輝炎がベース時同様に視野全体を覆うほどに伝播しており、直噴燃料流量の減少が直ちに大幅な黒煙の低減にはつながらない結果となったと考えられる。

図 28 の熱発生率と NOx 排出濃度より、直噴燃料の燃焼から NOx が生成すると予測されたことから、直噴燃料流量と NOx 排出濃度の関係について図 30 に示す。この図より、いずれの予混合気空燃比においても直噴燃料流量が、NOx 排出濃度と強い相関をもっていることがわかる。この要因としては、まず直噴燃料が増加するとそれだけ当量比近傍の領域が増大することが考えられる。また、図 28 より直噴燃料流量は、予混合燃料の燃焼にも直噴燃料の着火遅れにも直接の影響を及ぼさない。よって直噴燃料着火時の雰囲気温度は同一の予混合気空燃比条件ではほぼ等しいと考えられ、直噴燃料の流量が増加すると、それだけ燃焼時の最高温度が上昇することとなる。これらのことから直噴燃料流量により NOx が単調増加すると考えられる。したがって、さらなる排出ガス改善には、直噴燃料の燃焼におけるエミッション低減がポイントとなる。

### 5.3.3. 直噴燃料噴射時期の排出ガスおよび燃費率への影響

予混合圧縮着火では、予混合燃料割合を可能な限り高くすることが低エミッション化につながる。しかし、予混合燃料に軽油を用いた場合には A/F により低エミッション化の限界があることから、高負荷領域において予混合燃料のみでは不足する負荷を直噴燃料で補い、さらに直噴燃料の噴射時期を遅延させることによる低エミッション化を試みた。

図 31 は 75% と 40% 負荷における、NOx と黒煙のトレードオフ関係を示したものである。図中のプロット脇の数値は直噴燃料の噴射時期を表し、また、NOx 排出濃度についてはそれぞれベース条件を基準とした排出率に換算してある。NOx 排出濃度は、噴射時期を遅角することにより低減し、その影響は負荷率や予混合燃料割合にほとんど依存せず、すべての予混合燃料割合で、同等の低減効果が発揮された。

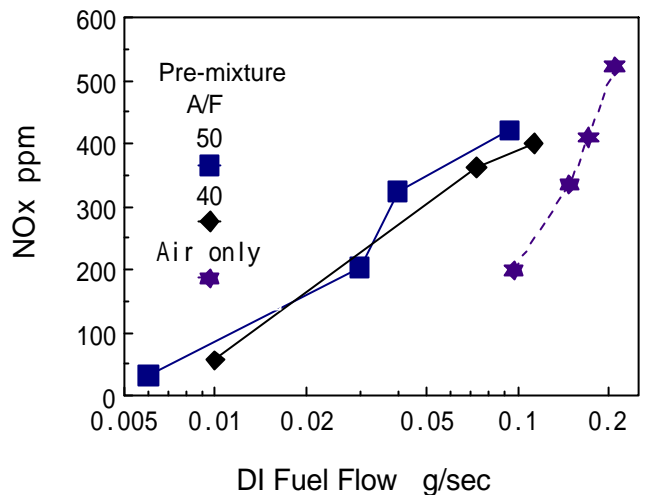


図 30 各予混合気空燃比条件における直噴燃料流量に対する NOx 排出濃度

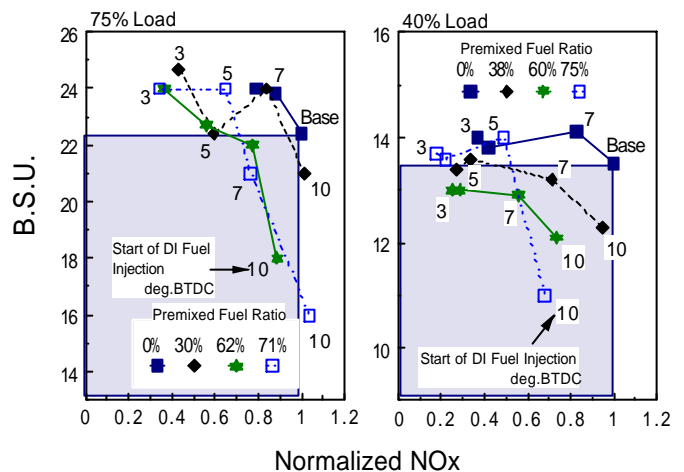


図 31 40% および 75% 負荷率の各予混合燃料割合における噴射時期による NOx と黒煙のトレードオフ関係

75% 負荷では、高い予混合燃料割合の時ほど直噴燃料噴射時期遅角による黒煙の増加幅が大きい。したがって、トレードオフという観点からみると遅角させることによるメリットは小さく、3deg. BTDC 噴射時には予混合を行っても黒煙はほとんど低減できず、逆にすべての予混合燃料割合でベースをも上回った。以上より、この負荷率での最適値は予混合燃料割合 60 ~ 70% で 7deg. BTDC 噴射時のもので、黒煙をベース以下に抑しつつ、20% を超す NOx 低減がはかられた。

一方、40% 負荷では、予混合を行うことで、大幅な NOx 低減効果があることから、噴射時期遅角との相乗効果は大きい。また、黒煙排出濃度については傾向が 75% 負荷時とほぼ同じだが、増加のペースは緩やかで、予混合を行った上に噴射時期を遅らせてもベースを上回ることはほとんどなかった。その結果、予混合燃料割合 60% 以上では、3 ~ 5deg. BTDC

噴射とすることで黒煙の増加を招くことなく、ベース条件から70%を上回るNOx低減効果が得られた。このことから特に軽負荷において予混合圧縮着火と噴射時期遅角を組み合わせることで、大幅なNOx改善が図れることがわかった。

直噴燃料噴射時期による図示燃費率への影響を、通常のディーゼルと予混合圧縮着火について比較したのが図32である。この図では、噴射時期による影響を明らかにするため、各予混合燃料割合におけるベースの10deg.BTDCの場合を基準として比較した。図より、予混合燃料割合の高い場合の方が悪化幅が小さく、40%負荷時をみると予混合燃料割合60%以上ではほとんど無視できるレベルとなる。これは、直噴燃料が出力に寄与する割合が小さくなるためと考えられ、予混合圧縮着火においては噴射時期遅角による燃費率の悪化は小さいといえる。しかしながら、既報で述べたように軽油予混合時には燃費率の悪化がみられ、今回の実験においても予混合燃料割合30%時には約15%、同60%時には30%を超える悪化がみられたことから、これらの改善が急務であるが、他の方策により予混合燃焼の着火時期や未燃燃料排出が制御可能となった場合には、予混合圧縮着火において噴射時期遅角は燃費率の悪化を極力抑えたエミッション改善方策になりうるといえる。

#### 5.3.4. 直噴燃料噴射時期による燃焼挙動変化

上記のNOxおよび黒煙の増減要因を解析するために、燃焼解析を行った。図33は、予混合燃料割合75%時に直噴燃料噴射時期を変化させた場合の気筒内圧力、熱発生率および気筒

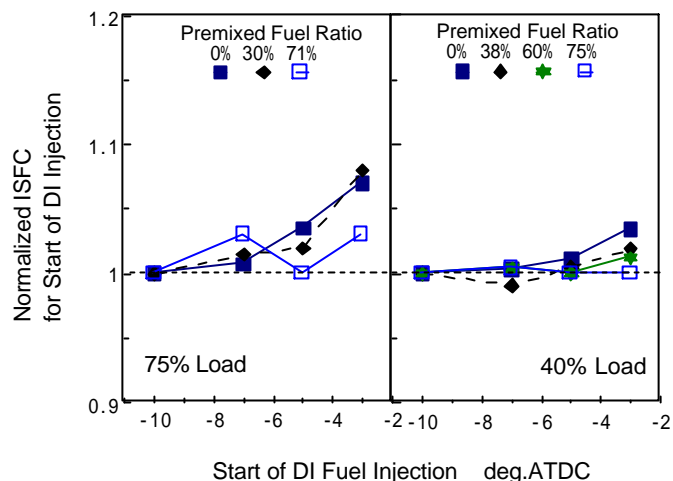


図32 40%および75%負荷率の各予混合燃料割合における噴射時期による図示燃費率の変化率

内平均温度の変化を示したものである。軽油予混合時には、直噴燃料の噴射を待つことなく圧縮自己着火が行われるため、第1期燃焼については直噴燃料の噴射時期による違いはほとんどない。それに対して、直噴燃料が燃焼していると考えられる上死点以降における熱発生の上昇時期が噴射時期の遅れの分だけ異なっている。そして噴射時期の遅延がそのまま気筒内平均温度の最大値の低下につながっており、このことがNOx低減要因と考えられる。しかしながら、ベース条件と比較すると最高温度が大幅に高いことにはかわりはなく、それでもベース条件から40%のNOx低減がはかれたことは燃料の大半がNOx

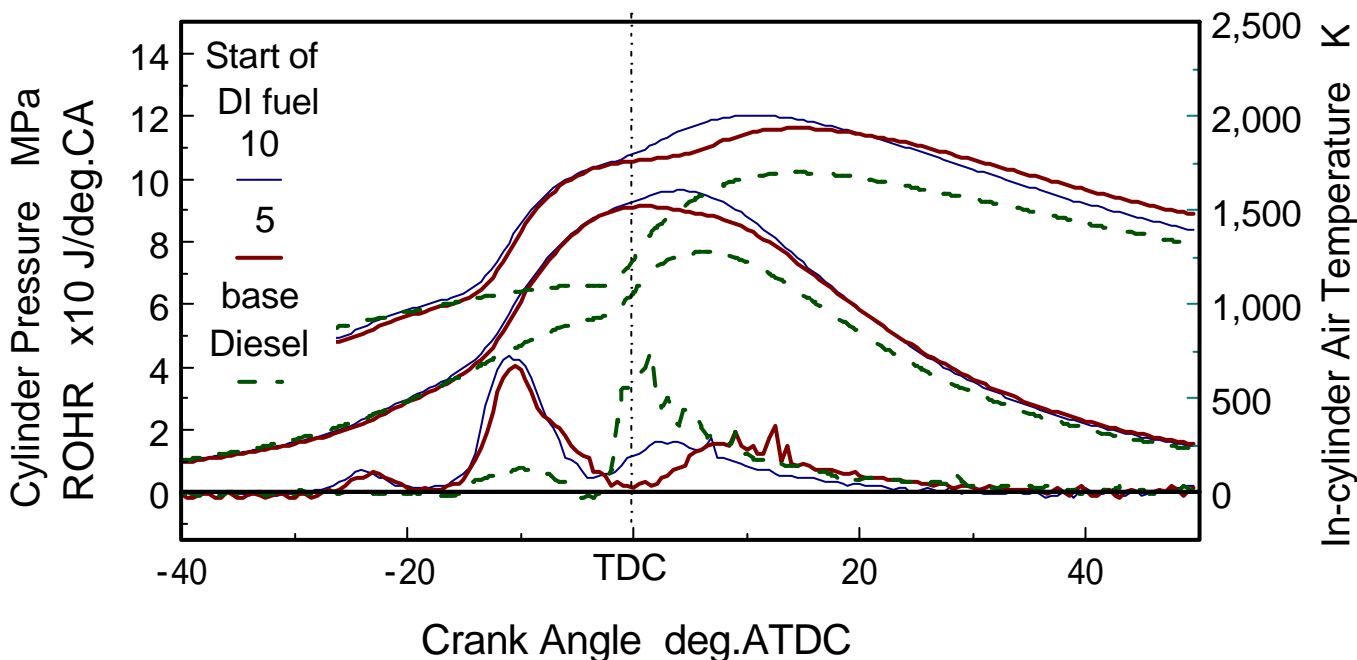


図33 直噴燃料噴射時期による気筒内圧力、熱発生率および気筒内平均温度

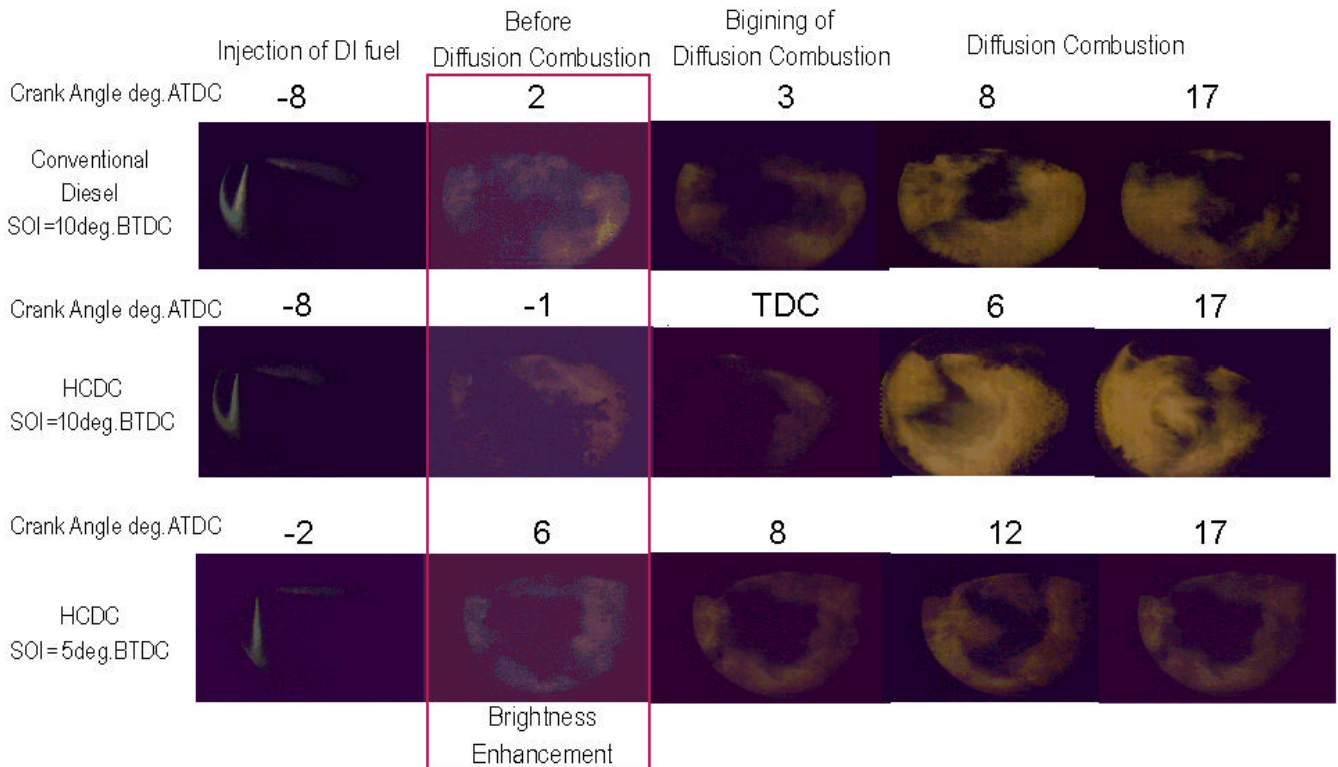


図34 予混合圧縮着火（軽油使用時）の噴射時期変化時の燃焼挙動比較

の発生しにくい均一予混合燃焼していることによるといえる。前述のように、 $\text{NO}_x$  生成の大部分が直噴燃料の燃焼によることと一致している。また、黒煙の生成については、直噴燃料の着火から輝炎の拡大にいたるメカニズムが生成要因の鍵となると考えられる。そこで、燃焼写真を用いた解析を試みた。

図34は75%負荷におけるディーゼル燃焼と予混合圧縮着火および噴射時期を遅角させた予混合圧縮着火の場合の燃焼映像である。本映像はカラーCCDカメラによりシャッター速度1/4000秒で、各サイクルごとに1クランク角ずつ撮影したもので、連続して撮影されたものではない。この図における各条件の2番目の映像は輝炎は観察されなかったものの、輝度を増大する等の処理を行うことにより得られたもので、このわずかに明るい部分は噴霧から形成された混合気塊が高温下で外側より燃焼していく様子が映し出されたものと考えられる。3番目の着火または拡散燃焼の開始時の映像を見ると、このような混合気塊の中から輝炎が発生し、その部分が過濃混合気であると推測される。その輝炎の発生は通常のディーゼル燃焼ではキャピティ外壁付近で発火するのにに対して予混合圧縮着火では着火遅れが小さいこともあり、ほぼ噴霧中から輝炎が発生している。そして5deg.CA遅らせた場合には着火遅れがやや拡大

し、再び壁面付近より着火している。その違いが4～6deg.CA後の4番目の映像の変化の要因となる。すなわち通常のディーゼル燃焼とリタードした予混合圧縮着火ではキャピティ外周に沿った形で輝炎が発達および移動していくのに対して、予混合圧縮着火では噴霧周辺からも輝炎が発生している。このことは噴霧が空気を取り込むには逆効果となると考えられるが、雰囲気温度が通常のディーゼル燃焼よりも高いため、すすの再燃焼が促進されると考えられる。そのため輝炎は高い輝度を持って大きく広がり、結果的に黒煙の低減につながったものと考えられる。一方、リタードした予混合圧縮着火では、輝炎の輝度は著しく低い。この要因の一つとして、黒煙の生成が多いことがあげられるが、火炎の輝度自体も低いものと予想される。このような燃焼はEGRを行ったときに近いもので、図33の熱発生率より、10deg.BTDC噴射時には予混合燃焼に引き続いて直噴燃料の燃焼が行われるのに対して、5deg.BTDC噴射では予混合燃焼は噴射開始時にほぼ終了しており、直噴燃料の燃焼はまったく別個に行われる。これより内部EGRの効果により大きくなっているものと推測される。そのため、直噴燃料着火時の気筒内平均温度は図33をみるとほとんど差がないにも関わらず、着火遅れが大きくなることに加え、 $\text{NO}_x$  低減には一定の効果がありながら黒煙が増加したといえる。また、燃

写真より、黒煙が輝炎中で生成されている様子が観察されるが、各条件において4番目の拡散燃焼前期の輝炎分布をみると、いずれも2枚目の混合気塊の分布と、時間の経過によりややずれのある場合もあるが、ほぼ一致する。このことから、着火前の混合気分布が黒煙生成に及ぼす影響は大きいと考えられる。しかし、着火遅れが拡大して混合が促進されると推測されるリタード時に黒煙が逆に増加したことから、今後さらなる黒煙の低減には様々な方向からの検討が必要となる。

### 5.3.5. 実用時のエミッション改善効果の予測

均一予混合圧縮着火燃焼を行うことによるエミッション改善幅をより現実的に定量化する手法として、13モード試験法で用いられる各回転数および負荷領域におけるエミッション測定を行い比較を行った。本試験においては、燃料には軽油のみを用い、機関最高回転数を2,500rpm、アイドルを600rpmとした。機関回転数によりベース条件における最適な直噴燃料噴射時期を設定したが、予混合化を行う際に変更はしていない。予混合燃料噴射量0mg/cyc.（ベース）、5mg/cyc.、10mg/cyc.の各条件で運転を行い、各モード条件のNOx排出量と黒煙濃度より算出したPM排出量の結果を図35に示す。モード番号1および4はアイドルングであり、安定した予混合圧縮着火を行えないことから除外した。この図より、低回転低負荷運転である2～6モードにおいてはPM低減は見られない一方でNOx排出量は予混合燃料を増やすにつれて低減した。それに対して、高回転高負荷領域である8～12モードにおいてはNOx排出量には大きな変化がないものの、予混合燃料を増やすことで有意なPM低減効果があることがわかった。7番目のモードでは、NOx、PMともに低減したが、これは2,000rpm、40%負荷で運転されるもので、高回転により、予混合燃料の自己着火開始がやや遅れて上死点に近づくことにくわえて、比較的軽負荷であることから均一希薄化も促進され改善効果が大きかったと考えられる。

この結果から、最適な予混合燃料噴射量の条件を選んだ予混合圧縮着火を用いた場合のエミッション排出量の合計を通常のディーゼル燃焼の場合と、比較を行った結果を図34に示す。重み計数41%を占めるアイドル領域で改善が図れなかったこともあり、飛躍的な改善は困難で、5%程度のNOx低減と20%弱のPM低減が図られるにとどまった。より現実的な形で大幅な改善が図れなかったことから、軽油を予混合燃料として用いる場合には、他の排出ガス改善方策の併用あるいは燃料の改質等が望まれる。

### 5.3.6. EGRの影響

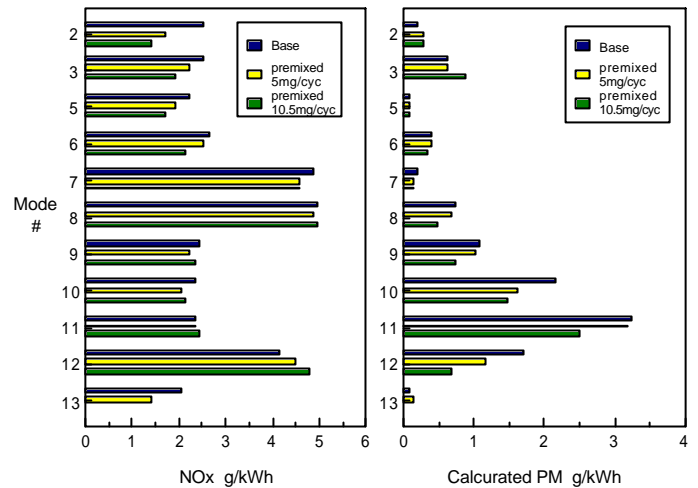


図35 13モード相当運転時のディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼（HCDC）時のエミッション比較

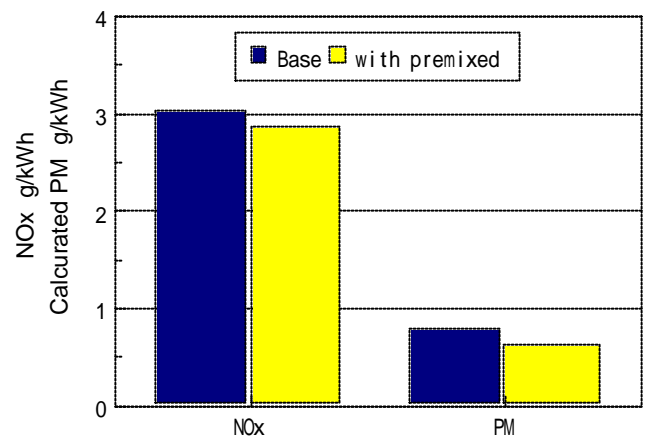


図36 13モード相当運転時のディーゼル燃焼と予混合圧縮着火燃焼時のエミッション比較

予混合圧縮着火時のEGRの影響を実験するにあたり、負荷率40%を採用した。このため、広い範囲の予混合燃料割合についてEGRの影響を調べることができ、高負荷域では実現不可能な予混合燃料割合99%についても実験を行った。また、EGR率は10%刻みで上限を30%とした。そのときの吸気酸素濃度は約18.2%である。これまでの研究結果より、吸気酸素濃度が18%以下になると急激に燃焼が悪化することから、今回用いた値はEGR率の上限としては適当な値と考えられる。

図37に、吸入空気酸素濃度を変化させた場合の、予混合燃料割合に対するNOx排出濃度変化と、EGRを行わない場合を基準としたNOx排出率から低減効果を表した。40%負荷においては、EGRを行わなくても予混合燃料割合を高めることが有効なNOx低減方策となり、において予混合燃料割合99%では20ppm以下の低NOx燃焼が実現する。EGRによ

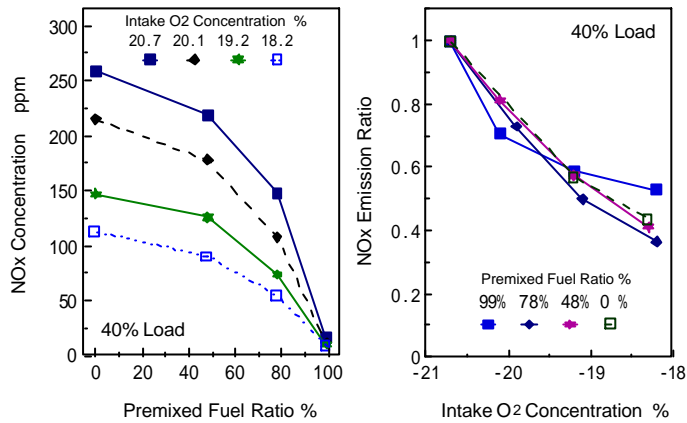


図37 EGRを適用した場合の予混合燃料割合によるNOx排出濃度とディーゼル燃焼を基準とした吸気酸素濃度によるNOx排出率

り吸気酸素濃度を低下させた場合、絶対的な排出濃度は低減する一方、予混合燃料割合による排出傾向はほとんど変わらない。そこで示すEGRを行わない場合を基準としたNOx排出率をみると、絶対的に低い値を示した予混合燃料割合99%時ではややばつぎが見られるものの、予混合燃料割合によらず、ほぼ同等のNOx低減率が得られた。通常のディーゼル燃焼において、EGRによるNOx低減率は吸気酸素濃度に依存し、負荷は影響しないが<sup>7)</sup>、本実験の結果から予混合圧縮着火においても同様の効果が得られるものと考えられ、直噴燃料噴射量の少ない高予混合燃料割合においても、吸気酸素濃度の低下によるNOx低減率は同等となったと考えられる。なお、予混合圧縮着火におけるNOx生成は直噴燃料によるとしているが、予混合燃焼中にまったく生成されていないかは十分にはわかっていない。とりわけ予混合燃料割合99%時においては、NOxの絶対生成量が少ない上に、1%に満たない直噴燃料がNOx生成にどれだけ影響したかは明確ではなく、予混合燃焼で発生するわずかなレベルのNOxが、図37においてややばつぎが大きくなる要因となっている可能性もある。しかし、絶対的な値が極めて低いことからこの条件でのNOx低減は特に重要ではない。

図37と同じ条件で黒煙排出濃度について示したのが図38である。EGRによる黒煙濃度の影響は、予混合燃料割合による違いもみられるが特に顕著なものではなく、排気ガス量の減少を考えれば同等とみて差し支えないレベルである。通常のディーゼル燃焼において、EGRによる吸気酸素濃度の低下が18%程度までは、黒煙の増加は生じない<sup>8)</sup>。予混合圧縮着火においても吸気酸素濃度18%のレベルまでは、同様の排出特性となり予混合圧縮着火による黒煙低減効果が維持されるものと考えられる。

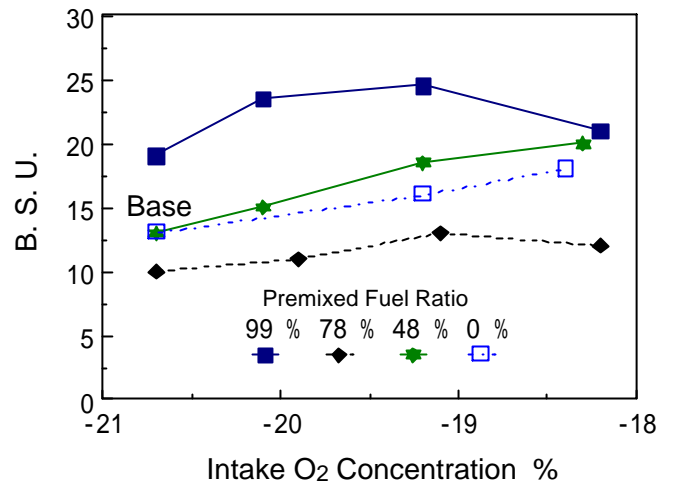


図38 各予混合燃料割合条件の吸気酸素濃度による黒煙排出挙動

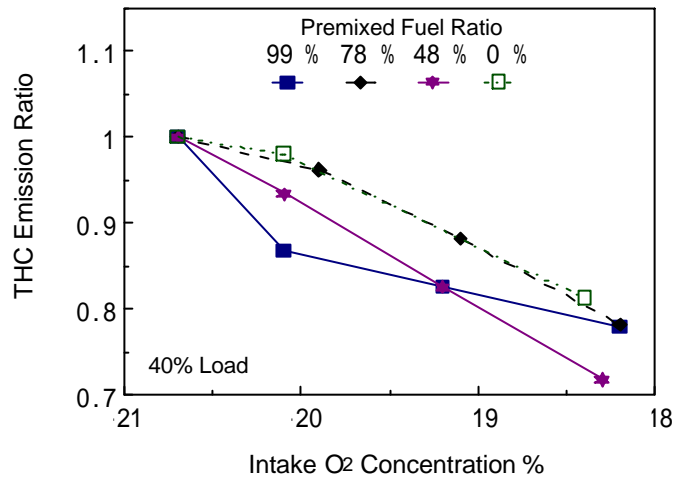


図39 各予混合燃料割合条件の吸気酸素濃度によるTHC排出挙動

図39にはEGR時のTHC排出量についてEGRなしを基準としたときの比率を示した。すべての条件で、EGRにより排気ガス中のTHC排出濃度に大きな変化はみられなかった。しかしながら、EGRにより排気ガス量が減少したために、排出量としてみると低減しており、EGR30%時にはすべての条件でEGRなしの場合から20%以上低減した。もっとも、予混合燃料割合の高い条件では依然として1%近い排出濃度であることから、このレベルの改善で予混合圧縮着火方式の一つの課題である多量のTHC排出の問題が解決されたとはいえないが、有効な低減手法の一つであるといえる。

次にEGR時の燃焼挙動について解析を行った。図40に各予混合燃料割合のEGR率による熱発生率の違いを示す。上下の図では予混合燃料割合が異なることから第1期燃焼のピークに大きな差異がみられる。しかしながら、どちらの場合でも、EGRによる自己着火時期や燃焼期間などの熱発生率挙動の変化

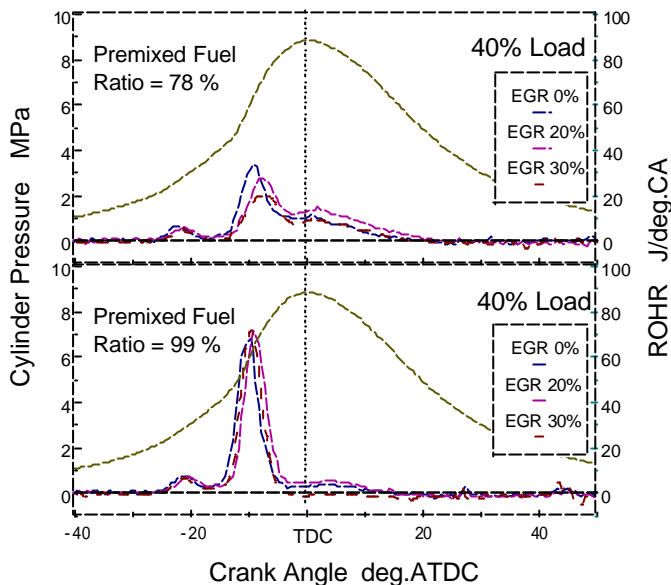


図40 EGRによる気筒内圧力と熱発生率変化

はほとんどみられない。したがって、今回行った30%以下のEGR率では、酸素濃度が18%以上であることもあり、EGRが必ずしも燃焼を阻害する要因とならないといえるが、逆にこのレベルのEGRにともなう吸気酸素濃度の低下により、着火時期を遅らせるような制御を行うことは不可能か、可能であってもごくわずかである。このようにEGR時にも大きな変化のない挙動の燃焼が行われたことにより、NOx排出がEGR率、またはそれによる吸気酸素濃度の低下により、ほぼ様な低減傾向を示し、燃費率についてもEGRによる変化はほとんどみられなかった。以上より、EGRにより吸気酸素濃度を18%程度に抑え予混合燃料割合を最適化することで、NOxと黒煙の同時低減の可能性が認められた。

5.3.7. 過給による排出ガス改善効果

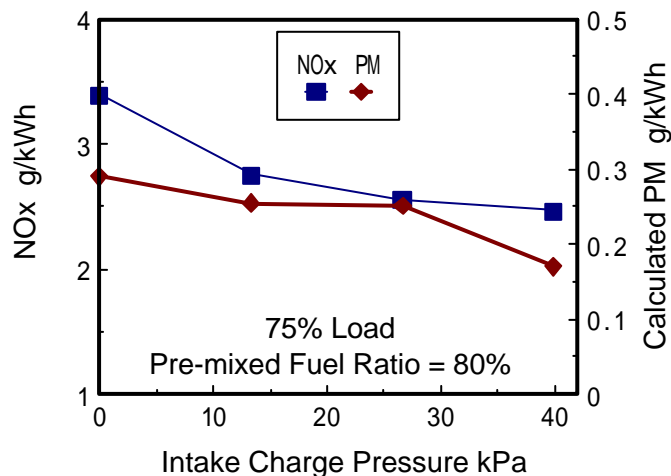


図41 過給圧力によるNOx、PMの排出挙動

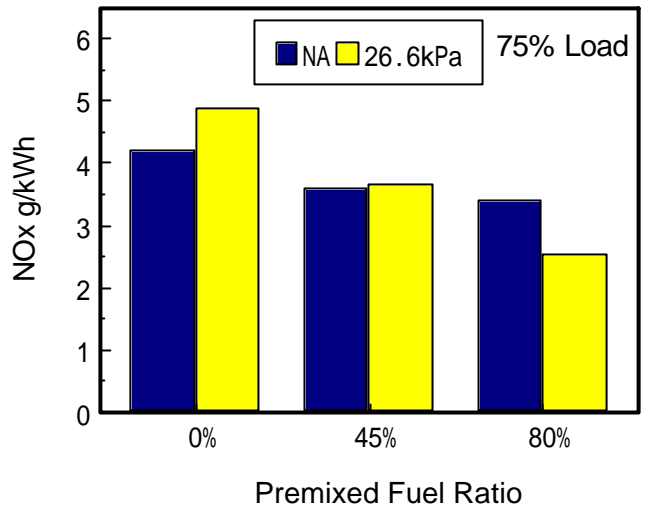


図42 各予混合燃料割合における過給時と無過給時のNOx排出量比較挙動

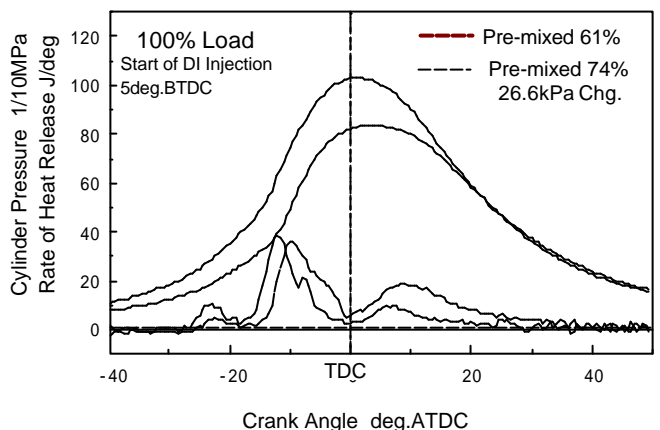


図43 過給時と無過給時の気筒内圧力および熱発生率比較

負荷率75%で予混合燃料割合80%時の過給圧力に対するNOx・PMの排出挙動について示したのが図41である。PM排出量は過給により吸入空気量が変化するために、黒煙排出濃度から計算式により求めた<sup>7)</sup>。過給圧力を高めていくと、NOx・PMともに低減し、過給圧力40kPaでNOx排出量は30%以上の低減をみた。通常のディーゼル燃焼においては過給を行うと、NOx排出量は増加する傾向があるが、予混合圧縮着火燃焼の場合には減少したことから、予混合燃料割合と過給との関係について解析を行った。

負荷率75%で各予混合燃料割合における、過給を行わない場合と行った場合のNOx排出量を比較したのが図42である。この図から、予混合を行わない場合には過給時にNOx排出量が増大しているが、予混合燃料割合45%時には同等、80%時には過給を行った方がNOx排出量が低減していることがわかる。通常のディーゼル燃焼においては、多量に噴射さ



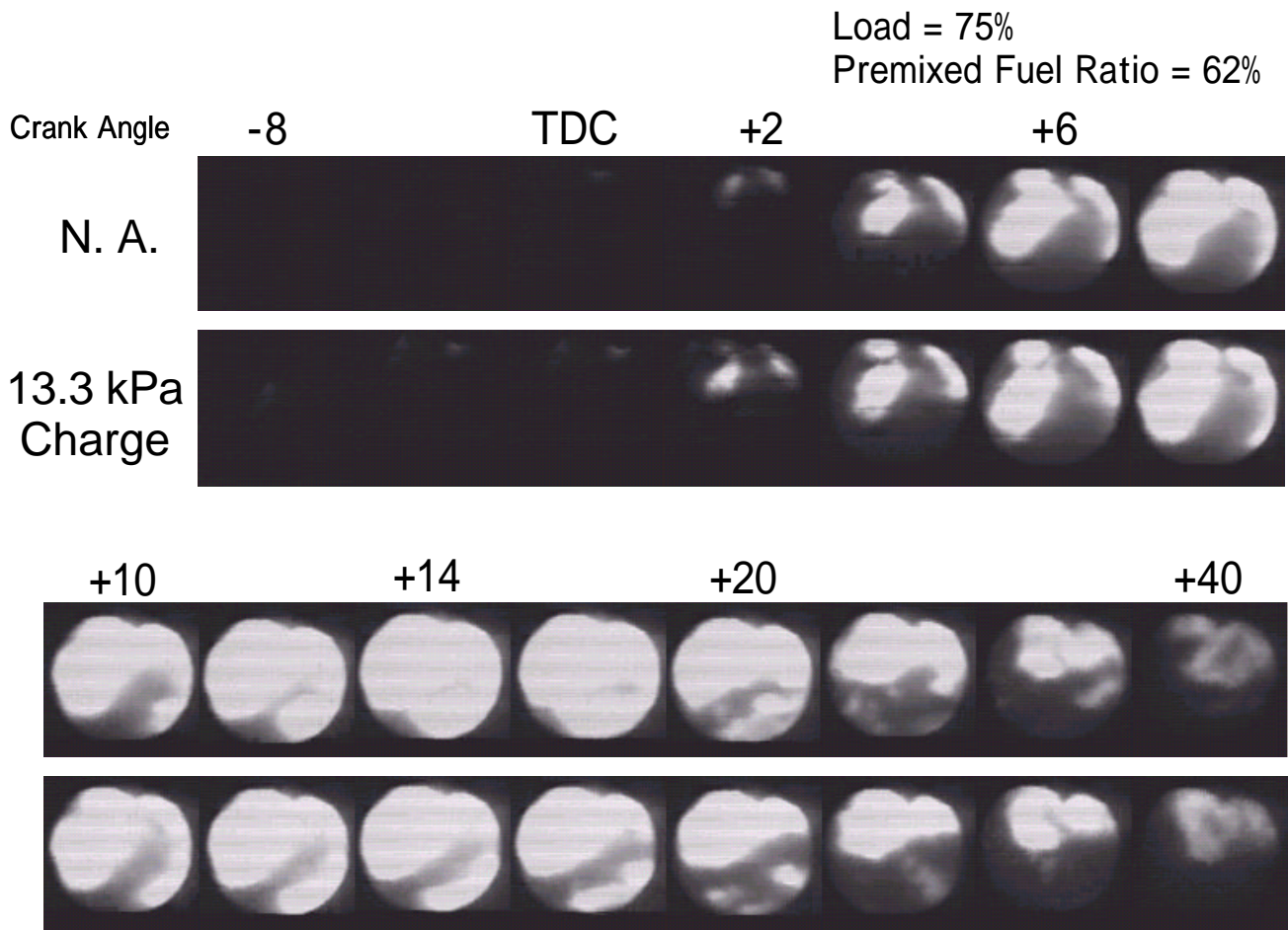


図 44 過給の有無による予混合圧縮着火の燃焼挙動比較

れる直噴燃料噴霧の中央部は、大幅な燃料過剰状態にあるため、過給してもなお過濃、あるいはストイキ状態の領域が多く存在すると考えられる。それに対して、予混合燃料割合が高い場合には、直噴燃料は少量となることから、もとより燃料過剰領域は少なく、また、その過剰領域においても小規模な過濃状態であるために、過給による希薄化の効果は大きく、 $\text{NO}_x$  が低減したと考えられる。

その過給による $\text{NO}_x$  低減要因について、燃焼解析を行った。図 41 は予混合圧縮着火燃焼の過給の有無による気筒内圧力と熱発生率を比較している。過給の有無により予混合燃料割合を変えているが、これはそれぞれの条件における最大安定予混合燃料割合に近い場合である。過給を行った場合には、冷炎反応による熱発生が高くなり、やや予混合燃焼の立ち上がりは早くなっている。無過給時において、予混合燃料割合 13% の差は予混合気の着火にほとんど影響を及ぼさないことから、これらの現象は過給による気筒内圧力の上昇によると考えられる。両者の熱発生率を比較した場合、過給時に予混合燃料割合がやや高いことから、上死点以後の直噴燃料による燃焼の比

重が軽いことがエミッション改善につながると予測されるが、過給による改善効果を説明するには十分ではない。

そこで、燃焼映像を用いて解析を試みた。負荷率 75%、予混合燃料割合 70%、直噴燃料噴射時期 5deg. ATDC における燃焼映像を過給の有無により比較を行ったのが図 42 である。また、燃焼の差異を定量化するために、両条件のエンドス

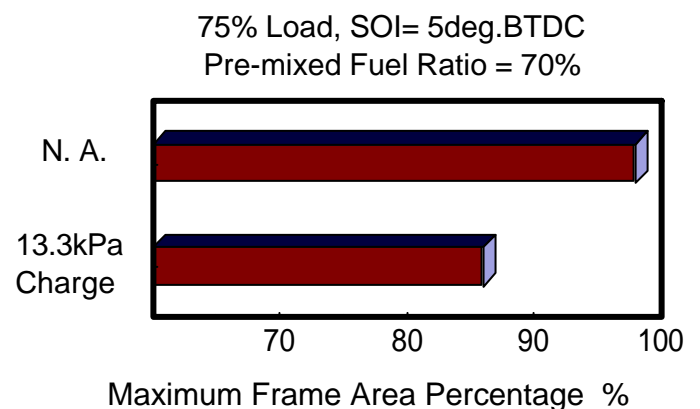


図 45 過給の有無による燃焼室内最大火炎面積の比較

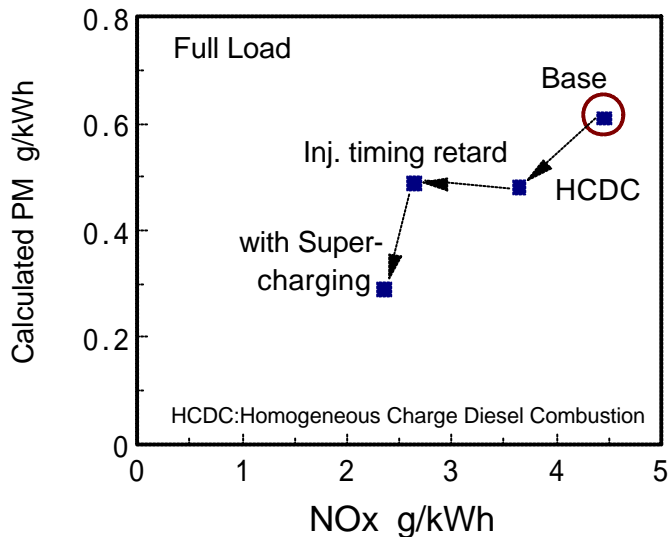


図 46 各種改善効果併用による予混合圧縮着火燃焼のNOx、PMのトレードオフ改善効果

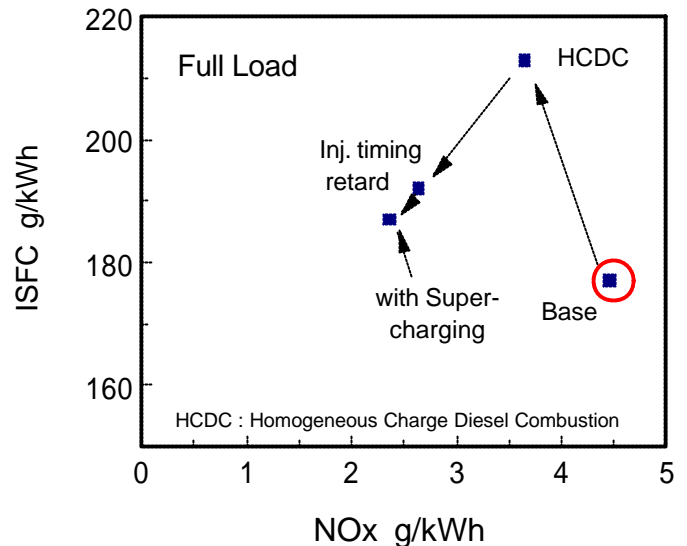


図 47 各種改善効果併用による予混合圧縮着火燃焼のNOx、図示燃費率のトレードオフ改善効果

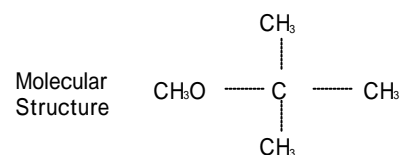
コープ視野内の最大火炎面積比較を行ったのが図 43 である。この図をみると、無過給条件では直噴燃料の燃焼が、一時的に輝炎が視野のほぼ全体を覆いながら進行したのに対し、過給時には輝炎が視野全体を覆うことはなかった。これは着火遅れが極度に小さく拡散燃焼が行われる直噴燃料の燃焼時において、過給により周囲の空気量が増大し、燃料過剰領域が低減したものと見える。このことから、高い予混合燃料割合の時においては過給を行うことはNOx、黒煙双方の低減に有効であることがわかった。

### 5.3.8. 各種改善方策の併用によるエミッション改善効果

全負荷時の、NOx と黒煙濃度より計算式により求めたPM排出量についてまとめたのが図 46 である。この図において、予混合燃料割合はトレードオフが最適となる値をとっている。予混合燃料を軽油とした場合、予混合を行うだけでは過早自己着火等の問題もあり、とくに図で示したような高負荷領域における排出ガス改善幅はわずかである。そこに噴射時期制御や中間冷却機付き過給を行い、それぞれを最適化した場合、噴射時期の遅角によりNOxを、過給によりPMを低減することが可能となり、NOx・黒煙ともにベース状態から飛躍的な改善が期待できることがわかった。しかしながら、エミッションの改善に際して、ディーゼル機関において最も重要である高効率性を犠牲にすることはできない。そこで、NOx 排出量と図示燃費率のトレードオフ関係について、図 47 に示した。既に述べたとおり、軽油を用いた予混合圧縮着火燃焼では燃費率は悪化する。しかし、噴射時期遅角を行った場合、やや予混合

表2 MTBEの各種物性値および化学式

構造式	$\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$	自己着火温度 ( )	460
分子量	88.15	低発熱量 (Kcal/kg)	8350
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.774	蒸発潜熱 (Kcal/kg)	77
沸点 ( )	55	理論空燃比	11.7
蒸気圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.55	オクタン価：リサーチ法	108
引火点 ( )	-26	オクタン価：モータ法	102
融点 ( )	-97.8	酸素分 (%)	18.2



燃料割合を低下させても大幅なNOx低減がはかれたことから燃費率は改善した。これに過給を併用することで、ベース条件に近いレベルを維持しつつ、NOx排出量をほぼ半減することを実現した。このらのことから、各種改善方を適用することがエミッションのみならず、燃費率の悪化を阻止する方策としても有効であるといえる。

### 5.4. MTBE 混合燃料使用時の改善効果

#### 5.4.1. MTBE の基本特性

MTBEはガソリンの調合基材として広く用いられているもので物性値を表2に示す。オクタン価が高い、含酸素化合物で

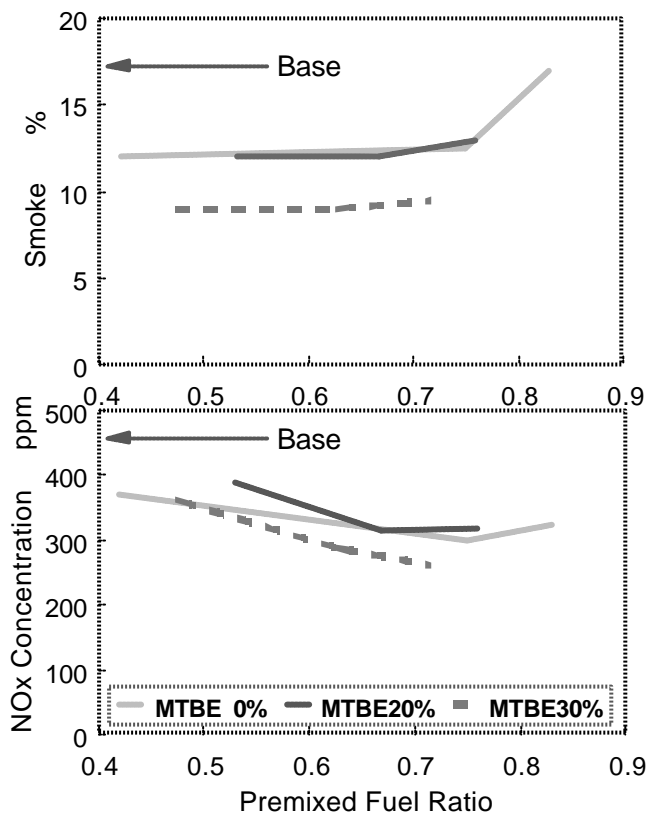


図48 MTBE添加時の予混合燃料割合に対するNOx、黒煙排出挙動

ある、沸点が低い、蒸気圧が低い、ガソリンと完全に溶解し水を加えても相分離しない、芳香族やオレフィン分を含まない等の性質がある。MTBEは分子中に酸素を含むことから黒煙の排出抑止が期待できること、低沸点であるために蒸発による均一予混合気の形成に適していること、低セタン価であり予混合気の早期着火の抑制が期待できること等、本方式に適した特性を有していると考えられる<sup>8)</sup>。したがって、MTBEを軽油に添加することにより低セタン燃料化し、高負荷運転領域における予混合圧縮着火の安定燃焼の可能性と排気改善効果を実験的に明らかにすることとした。

#### 5.4.2. MTBE添加時の排気特性

図48は、75%負荷における軽油予混合時と予混合燃料にMTBEを20%および30%添加した場合の、予混合燃料割合に対するNOxと黒煙の排出濃度を比較したものである。MTBE20%添加の場合には、軽油のみを予混合した場合と比較してNOx、黒煙ともに顕著な改善効果は認められないが、MTBE30%添加では軽油のみ予混合の場合と比較してさらに30%の黒煙低減効果が得られた。これらの黒煙低減効果はMTBE添加時の酸素量の増加によるものと考えられるが、少

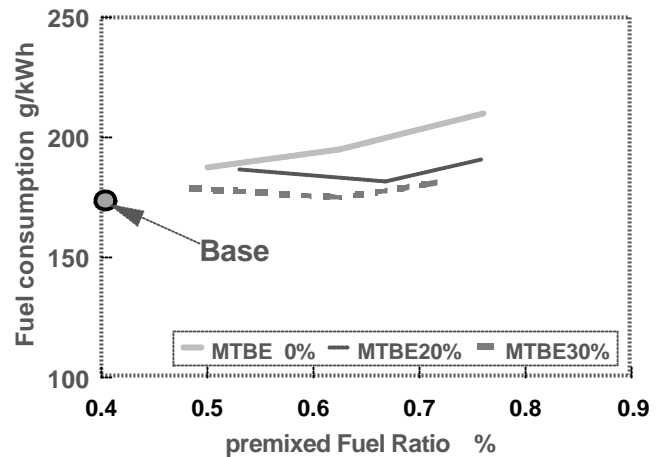


図49 MTBE添加時の予混合燃料割合に対する燃費率変化

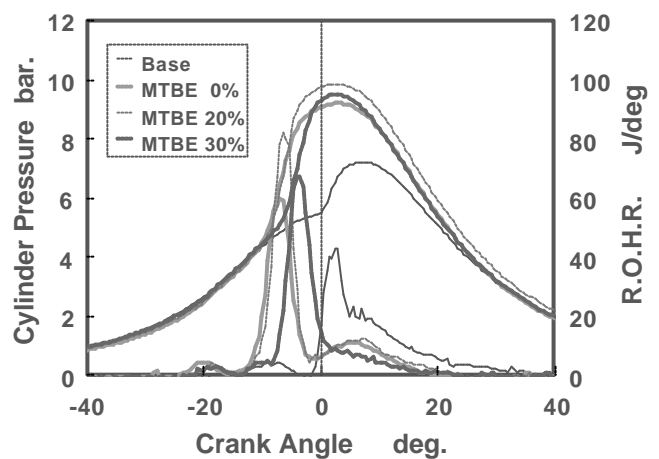


図50 MTBE添加時の気筒内圧力および熱発生率

量の添加では顕著な効果が得られないことも明らかとなった。NOxは予混合燃料割合が低い場合には改善効果が認められないが、予混合燃料割合が50%を越えると低減効果が現れた。これは含酸素燃料の効果というより蒸発特性の向上により、より均一な希薄混合気が着火以前に形成されたためと考える。THCについては予混合率が低いと差がみられないが高くなると濃度が下がり、約30%低減する条件もみられた。

図49は、MTBE添加時の燃料消費率改善効果を示したものである。燃料消費率については密度と発熱量の違いを考慮して軽油相当の換算値として示した。MTBE添加により、高予混合燃料割合における燃費率の悪化が改善できることを示している。特に、MTBE30%添加では、高予混合燃料割合においてもほぼベース条件に近いレベルまで燃料消費率が改善された。

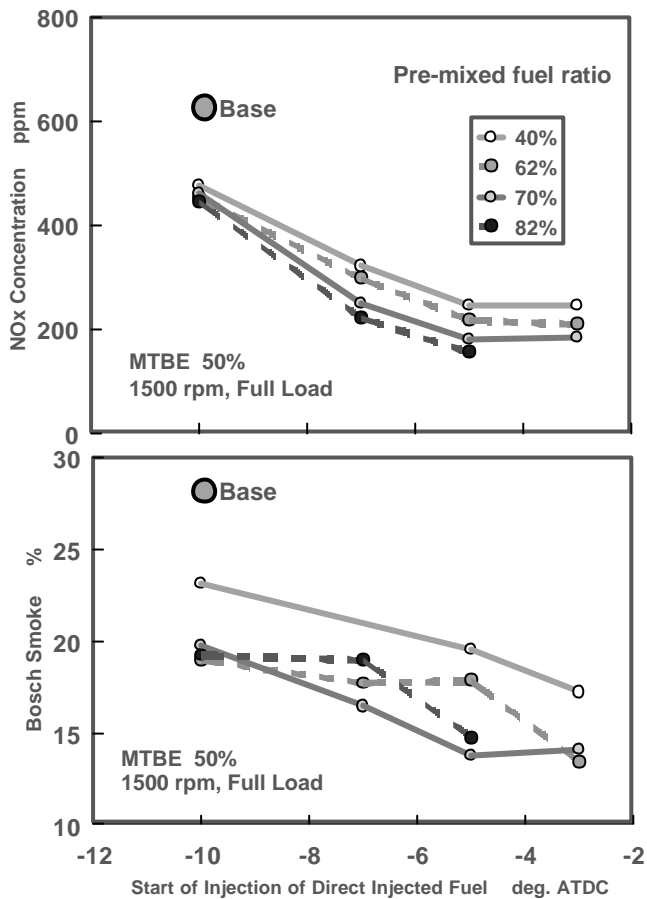


図 51 各予混合燃料割合時の噴射時期による NOx、黒煙の排出挙動 (MTBE50% 添加燃料使用)

#### 5.4.3. MTBE 添加時の燃焼特性

図 50 は、ベース条件および軽油予混合時、MTBE20%および30%添加時の熱発生率を示したものである。予混合燃料割合はベース条件をのぞいてすべて75%である。

MTBE 添加量が増大するにつれて予混合気の着火時期が遅延しており、これはMTBE 添加に伴うセタン価の低下によるものと考えられる。MTBE20%添加では無添加時と比較してあまり明瞭な違いは認められないが、30%添加ではクランク角で約5deg遅延しており、燃焼がより上死点に近いところで開始されることにより燃費が改善されたものと推察される。

以上のことから、MTBE 添加は予混合圧縮着火方式に適した燃料性状を得るための有効な手段の一つと考えられる。

#### 5.4.4. 全負荷時高MTBE 含有率における排気改善効果

以上の実験から、MTBE による燃焼の改善効果は主として過早自己着火の抑制効果よることは明らかであるが、少量の添加ではその効果が期待できない。したがって、つぎに、全負荷時の排気特性の改善を目的としてMTBE50% 添加による排

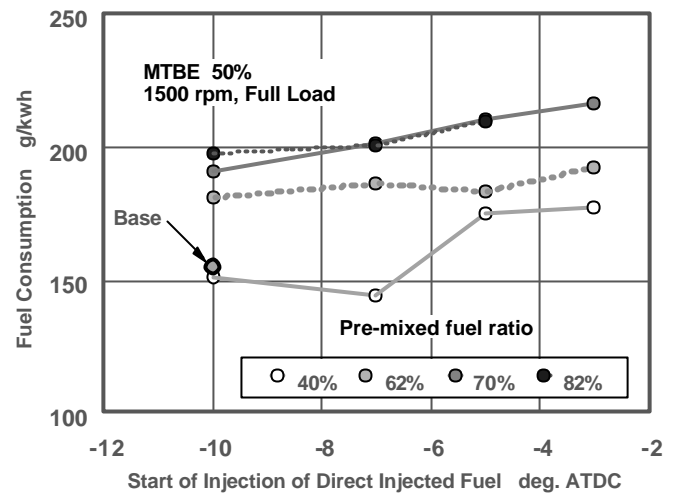


図 52 各予混合燃料割合時の噴射時期による図示燃費率 (MTBE50% 添加燃料使用)

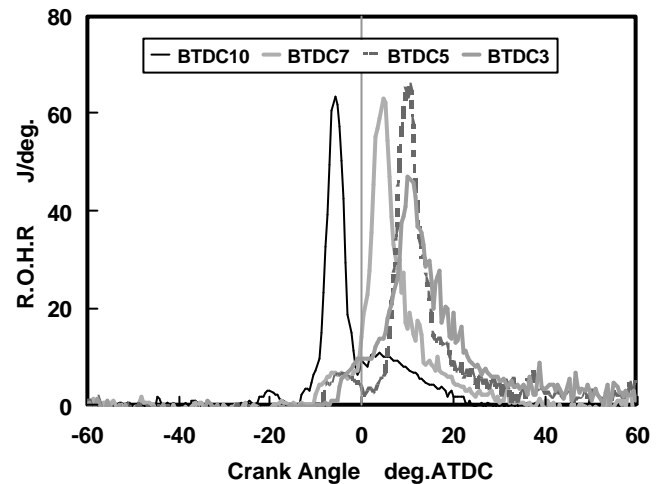


図 53 予混合圧縮着火でMTBE50% 添加燃料使用時の噴射時期による熱発生率 (予混合燃料割合 70%)

出ガス挙動を比較した。このような高い添加率にしたのは、燃料のセタン価を可能な限り下げようとするねらいによるものである。

図 49 は NOx および黒煙濃度の変化を直噴燃料の噴射開始時期との関係で示したものである。軽油予混合の場合にはこの領域での高予混合率による運転は不可能であったが、MTBE 添加により可能となった。MTBE 添加により、ベース時に比較して NOx は約 20% 減少するが、燃料噴射時期 10deg. BTDC では予混合燃料割合の影響はほとんど認められない。しかしながら、噴射時期を遅らせるとその違いが明瞭となり、予混合燃料割合の増加に伴って NOx 濃度は減少する。また、燃料噴射時期 5deg. BTDC までは燃料噴射時期の遅延に伴っていずれの予混合燃料割合においても一様に減少効果を示しているが、

さらに遅延させても頭打ちとなり噴射時期には最適値が存在する。

一方黒煙は、MTBE 添加により低予混合燃料割合の場合であっても約30%減少する。これは含酸素の効果によるものと考えられる。さらに予混合燃料割合を50%以上に増加させるとほぼ半減するが、予混合燃料割合の影響は顕著ではない。さらに燃料噴射時期を遅延させると減少する傾向を示す。この理由については後述する。

燃費率は図52に示すように予混合燃料割合の増加、燃料噴射時期の遅延に伴って悪化する。特に予混合燃料割合の影響が大きく、均一予混合・圧縮着火方式の欠点である高負荷領域における燃費の悪化がMTBE 添加によってもあまり改善されないことを示している。

図53は予混合燃料割合70%における燃料噴射時期の違いによる熱発生率の比較を示したものである。10deg. BTDC 噴射では熱発生率の立ち上がりが上死点前にあり、噴射時期を遅らせるにしたがって、熱発生率のピークは後ろに移動する。このことは軽油の場合と異なり、高予混合燃料割合においても直噴燃料により着火時期の制御が可能であることを示している。MTBE を高添加率で使用した場合、軽油の場合と異なり図49に示すように噴射時期を遅延させることによりさらなる黒煙の低減が可能である。この理由は、10deg. BTDC の場合、熱発生率の予混合燃焼によると見られるピークに続いて上死点付近から拡散燃焼と見られるピークが生じているが、遅延させた場合にはこの拡散燃焼と見られるピークは消滅する。このことから、MTBE を高添加率で用いることにより予混合燃料の過早自己着火が抑制されるとともに、直噴燃料の噴射時期を制御することにより着火時期の制御が可能であり、噴射時期を遅延させると予混合燃料が十分に給気と混合する時間が得られるために混合気の均一化が促進されるためと考えられる。

一方、図54に示すように噴射時期の遅延に伴って熱発生率の重心位置は上死点以後に移動し、等容度が下がるので燃費が悪化するものと思われる。

#### 5.4.4. EGR の影響

MTBE 添加率50%の条件で10%のEGRをかけた場合のNOxと黒煙の排出挙動変化を図55に示す。なお、直噴燃料の噴射時期は5deg. BTDC である。低予混合燃料割合ではEGR無しの場合と比較して20%程度のNOx低減効果が認められるが、高予混合燃料割合ではほとんど差異が認められなかった。一方、黒煙はEGRによる増加は認められず、高予混合燃料割合では逆に減少する傾向が認められた。

図56は予混合燃料割合30%及び70%におけるEGRの有無による熱発生率の変化を比較したものである。予混合燃料割合

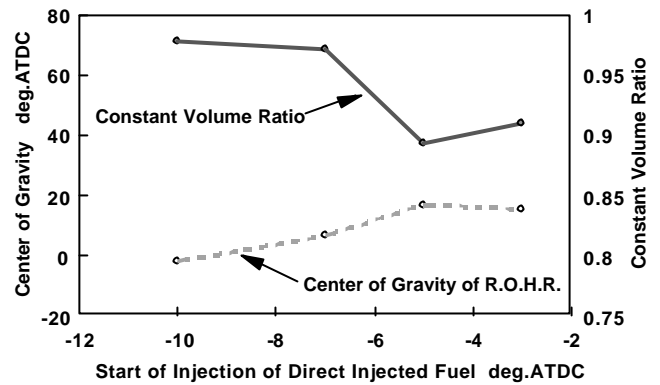


図54 予混合圧縮着火でMTBE50%添加燃料使用時の噴射時期による熱発生率の中心および等容度 (予混合燃料割合70%)

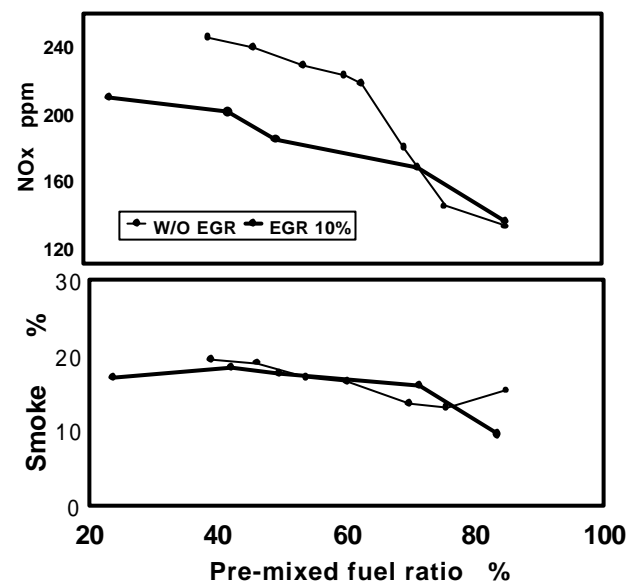


図55 MTBE50%添加燃料使用時にEGRを適用した場合の予混合燃料割合に対するNOx、黒煙排出挙動

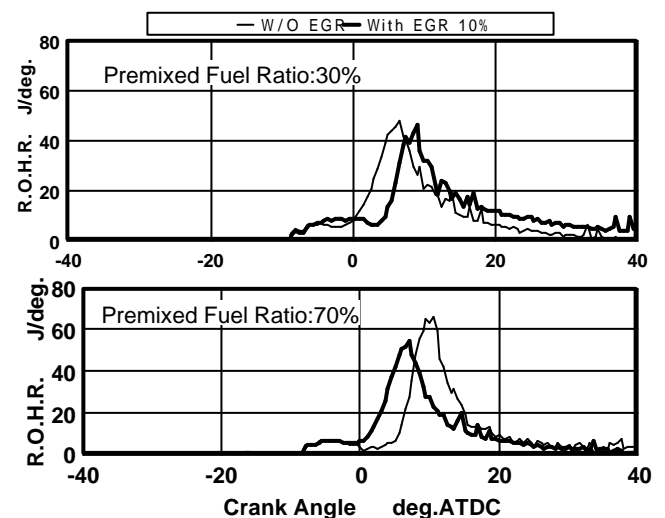


図56 MTBE50%添加燃料使用時にEGRの有無による熱発生率変化 (予混合燃料割合30および70%)

30%ではEGRにより着火遅れが大きくなるが、70%の場合には逆に着火遅れが短縮される。この現象は軽油予混合時にも認められるものでありMTBE添加の影響と言うよりは予混合圧縮着火方式に特有の現象と考えられる。高予混合燃料割合においては予混合燃焼と見られる急激な熱発生率の立ち上がりの前に予反応と見られる小さなピークが認められるが、このピークはEGRの有無に関わらず一定である。その後EGR時にはほとんど着火遅れ無しに予混合燃焼によるピークが立ち上がり、燃焼期間も短縮される。高予混合燃料割合では、EGRガス中にも高濃度の未燃燃料が混合気として存在するために直噴燃料の噴射開始時には、より着火しやすい予混合気条件となっている。一方、低予混合燃料割合では、予混合気空燃比が希薄であり、直噴燃料の燃焼が支配的要因となるのでEGRによる着火遅れの影響が現れたものと考えられる。

以上をまとめると、高混合率でMTBEを添加した場合、EGRは低予混合燃料割合ではNOxのさらなる改善に効果があるが、高予混合燃料割合ではその効果が認められない。黒煙はほとんど変化がないが、高予混合燃料割合では減少効果が認められる。これはEGRにより燃焼期間が短縮されるためと考えられる。

## 6. まとめ

ディーゼル機関の有害排出成分の生成領域である燃焼室内の燃料過剰領域をなくす方法として、均一予混合圧縮着火方式を提案し、その排出ガス改善効果のポテンシャルとその改善要因、および問題点について解析を行った。その結果、本方式はディーゼル新長期規制などを見据えた抜本的なエミッション改善に向け、大きなポテンシャルを持つことが分かった。しかし、その一方で、実用的なエミッション改善には問題点もあり、使用燃料に軽油をベースに用いて改善を試みる場合には、圧縮着火に適した添加剤の使用や、従来ディーゼル燃焼にて用いられてきた排出ガス改善方策の併用が必要である。

以下、本研究において行った実験結果を、本論にしたがって、予混合燃料の性状により分類してまとめる。

### 6.1. イソオクタン使用時

予混合燃料にイソオクタンを用い、軽油を直噴燃料として着火制御を行う方法は、本論で提案した予混合圧縮着火の概念をほぼ実現するサイクルを可能とし、大幅なエミッション改善効果を発揮した。このことから、均一希薄燃焼を行うことがエミッション改善に極めて有効であることが分かった。

・エミッション改善効果について、あらゆる負荷領域で、安

定した着火制御を維持しつつベースであるディーゼル燃焼の半分以下のNOx排出と、アイドル時と同等以下の黒煙排出レベルを実現した。

・予混合圧縮着火のエミッション改善効果についてKIVA-2を用いた数値計算を行った。その結果、均一化を図ることで、燃焼室全体で希薄燃焼が行われることから、局所的な最高温度が低下し、NOx生成の抑制につながる事が予測された。

・EGRを行うと燃焼が緩慢になり、燃費率がわずかに悪化する。しかしながら、予混合圧縮着火では黒煙の増加を伴うことなくNOxの大幅低減が可能となり、エミッション改善には効果的である。

### 6.2. イソオクタン+ノルマルヘプタン使用時

イソオクタンにノルマルヘプタンを混合し、リサーチオクタン価を50~100に変化させた場合、上記の低NOx燃焼が予混合気空燃比で28~80以上の広い範囲で観察された。このような実時間的に燃料性状を変化させるサイクルを現実の過渡運転で行うことは困難だが、予混合圧縮着火を理想的に適用できれば広範な負荷領域にわたり飛躍的なエミッション改善の可能性があることが示された。

### 6.3. 軽油使用時

自己着火しやすい軽油を予混合燃料として用いた場合、上死点前に自己着火をおこすことから、大幅な予混合化は燃費率の悪化を招き、気筒内圧力が異常に上昇するノッキングの問題もあり、エミッションの改善は小幅に止まる。このとき直噴燃料は着火源としての機能は失われ、二段燃焼的な燃焼が行われる。エミッションは直噴燃料流量と強い相関があることから、直噴燃料によるエミッションの改善が系全体の改善につながる事がわかった。

・軽油予混合時のエミッションを13モード相当試験と比較したところ、ほぼ同等の黒煙排出に対し、約10%のNOx低減が図られた。

・噴射時期遅角を行った場合、内部EGR的效果により、やや黒煙が増加するものの、NOxの大幅な低減が可能で、NOxと黒煙のトレードオフ改善に有効である。

・予混合圧縮着火ではEGRを行うことが、ただちに黒煙排出の増加につながることはなく、NOx低減手法として有効である。

・中間冷却器付過給を行うことは予混合気の希薄化につながり、ノッキング限界をやや上昇させることができる。予混合燃料割合の高い状態で過給を行うと、希薄化を大きく促進し、NOx、黒煙の同時低減が可能であった。

#### 6.4.MTBE 添加軽油使用時

MTBE はアンチノック性がよく、含酸素燃料であることから予混合圧縮着火に適した燃料で、有意な改善を図るにはある程度以上の添加量が必要だが、NO<sub>x</sub>、黒煙の同時低減および軽油予混合時より燃費率の改善が可能であった。

・MTBE 添加燃料により改善効果を発揮するには30%以上の添加量が必要であった。このとき、NO<sub>x</sub>、黒煙を同時に20%以上低減できた。また、MTBE30%添加では予混合燃料の着火開始が上死点に近づき、同50%添加では着火制御が部分的に可能となったことから、燃費率が軽油予混合時より改善され、通常ディーゼル燃焼に近いレベルとなった。

・EGR を行った場合、他の予混合圧縮着火の時と同様、黒煙の増加を招くことなくNO<sub>x</sub> 低減が図られたが、予混合燃料割合の高い領域ではその低減効果が小さくなった。

#### 6.5.本研究の効果と予混合圧縮着火の今後

以上より、本研究において、実現に際しては燃料性状、未燃燃料の排出対策等の様々な制約はあるものの、予混合圧縮着火方式を用いることにより、従来方式の延長では困難な低エミッション運転が可能であることが分かった。従来の高圧噴射化による燃料噴霧の拡散化を図るだけでは、NO<sub>x</sub> 生成を抑止するレベルの均一化を図ることは不可能である。そこで今後、現状を大きく上回る改善を行うにあたっては、様々なアプローチが行われるにせよ、従来のディーゼル機関では見られなかったレベルの均一化、燃焼室全体での希薄燃焼化を行うことが必要と考えられる。実際に現在行われている低エミッション化燃焼の研究において、予混合圧縮着火は重要な要素となっており、「次世代の低公害燃焼」として学会等で本研究が取り上げられた例もある。このように当初目的とした飛躍的な改善を図る燃焼方式として、本研究は一つの有効な可能性を提示することができ、他への波及効果を含めて、有効な成果を収めたものとする。

#### 参考文献

- 1) Takeda Y. et al., "Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection" SAE Paper 961163, 1996
- 2) Hashizume T. et al., "Combustion and Emission Characteristics of Multiple Stage Diesel Combustion" SAE Paper 980505, 1998
- 3) 柳原ほか、第13回内燃機関シンポジウム講演概要集 p365-369, 1996
- 4) 木村ほか、自動車技術会1997年春季学術講演会 No.972, p145-148, 1997

- 5) 青山ほか、自動車技術会講演前刷集 No.951 9534702
- 6) 河本ほか、自動車技術会2000年秋季学術講演会No.93-00, p13-17
- 7) Yokota H. et al., "New Concept for Low Emission Diesel Combustion" SAE Paper 970891, 1997
- 8) 山崎ほか、第16回内燃機関シンポジウム講演論文集 p121-126, 2000
- 9) 柳原ほか、自動車技術会2001年春季学術講演会 No51-01, p17-20
- 10) 浅海ほか、自動車技術会2001年春季学術講演会 No51-01, p13-16
- 11) Alkidas A. C., "Relationships Between Smoke Measurements and Particulate Measurements" SAE Paper 840412, 1984
- 12) Amsden A. A. et al. "KIVA- : "A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Labs., LA-11560-MS, 1989

#### 本研究に関する研究発表

- 1) 石井、小高、鈴木:ディーゼル機関の燃焼シミュレーションによる排出物生成過程の研究(第1報) - 燃焼制御条件によるNO<sub>x</sub> 影響要因解析への適用 - 自動車技術会1995年度秋季学術講演会前刷集 No.954 9539257 1995年10月
- 2) 石井、鈴木、小高:燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第1報) - 燃焼シミュレーションによる排出ガス特性の解析 - 平成7年度 第25回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1995年11月
- 3) 鈴木、小池、石井、小高:燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第2報) - 試験用ディーゼル機関による予混合燃料併用時の燃焼および排出ガス挙動 - 平成7年度 第25回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1995年11月
- 4) 鈴木、小池、石井、小高:均一予混合・圧縮着火ディーゼル機関に関する研究(第1報) - 実験用ディーゼル機関による予混合燃料併用時の燃焼および排出ガス挙動について - 自動車技術会1996年度春季学術講演会前刷集 No.961 9632127 1996年5月
- 5) 石井、鈴木、小高:均一予混合・圧縮着火ディーゼル機関に関する研究(第2報) - 燃焼シミュレーションによる排気改善要因の検討 - 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集 p359-364、1996年7月
- 6) 鈴木、小池、石井、小高:均一予混合圧縮着火ディー

ゼル機関に関する研究(第3報) - 超低NOx 燃焼領域の拡大とその挙動について - 自動車技術会 1996 年度秋期学術講演会前刷集 No.966 9639012 1996 年 10 月

7) 小高、小池、石井、鈴木: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第3報) - 高予混合率下での燃焼と排出ガス特性 - 平成8年度 第26回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1996 年 11 月

8) 鈴木、小池、石井、小高: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第4報) - 超低NOx 運転領域の拡大とその効果 - 平成8年度 第26回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1996 年 11 月

9) 鈴木: 均一予混合・圧縮着火方式によるディーゼルの燃焼と排気 自動車技術会シンポジウム「ディーゼル機関の次世代排出ガス低減・省エネルギー技術への挑戦」教材、1997 年 1 月

10) Suzuki H., Koike N., Ishii H., Odaka M., "Exhaust Purification of Diesel Engines by Homogeneous Charge with Compression Ignition Part1: Experimental Investigation of Combustion and Exhaust Emission Behavior under Pre-mixed Homogeneous Charge Compression Ignition Method", SAE Paper 970313, 1997 年 2 月

11) Ishii H., Koike N., Suzuki H., Odaka M., "Exhaust Purification of Diesel Engines by Homogeneous Charge with Compression Ignition Part2: Analysis of Combustion Phenomena and NOx Formation by Numerical Simulation with Experiment", SAE Paper 970315, 1997 年 2 月

12) 鈴木: 均一予混合圧縮着火ディーゼルの燃焼と排気特性 機械学会第74期通常総会ワークショップ「予混合圧縮着火エンジン」, 1997 年 3 月

13) 鈴木、小池、小高: 均一予混合圧縮着火ディーゼル機関に関する研究(第4報) - 軽油予混合下での低エミッションの可能性 - 自動車技術会講演前刷集 No.974 9738896 1997 年 10 月

14) 鈴木、小池、小高: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第5報) - 軽油のみにおける予混合・圧縮着火方式の燃焼および排出ガス挙動 - 平成9年度 第27回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1997 年 11 月

15) Suzuki H., Koike N. and Odaka M., "Combustion Control Method of Homogeneous Charge Diesel Engines" SAE Paper 980509 1998 年 2 月

16) 石井, 小高ほか: ディーゼル燃焼における噴射パラメータの影響解析 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集

( ) 1998 年 3 月

17) 鈴木: 予混合均一燃焼化によるディーゼル機関の排気改善の可能性 日本機械学会講習会「明日を目指すエンジンのコンセプト」講演集 1998 年 5 月

18) 鈴木、小池、小高ほか: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第6報) - 各種燃焼制御要因が軽油予混合・圧縮着火に与える影響 - 平成10年度 第28回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1998 年 11 月

19) 小高、小池、鈴木ほか: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の低公害化に関する研究(第7報) - 含酸素燃料の添加による予混合・圧縮着火燃焼時の燃焼と排気特性 - 平成10年度 第28回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、1998 年 11 月

20) Odaka M., Koike N., Ishii H., and Suzuki H., "Search for Method of Optimizing Homogeneous Charge Diesel Combustion" SAE Paper 1999-01-0184 1999 年 3 月

21) 鈴木、後藤、小高、狩谷: 燃焼方式の改善によるディーゼル機関の超低公害化に関する研究(第8報) - 予混合圧縮着火の実用運転領域における最適化と改善効果 -