

# DME を燃料とするクリーンディーゼルエンジンの研究開発 (第 5 報)

—局所リッチ燃焼による NOx 低減の試み—

環境研究領域 ※鈴木 央一 佐藤 由雄 安 乗一

## 1. はじめに

ディメチルエーテル (DME、構造式:  $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ ) を燃料とするディーゼル機関においては燃焼の際、粒子状物質 (PM) が生成されない。そのため、通常のディーゼル機関では窒素酸化物 (NOx) と PM の同時低減が課題とされるが、DME 機関では通常ディーゼル機関では PM 増加につながるため使用されない NOx 低減方を適用することも選択肢となりうる。

NOx の生成に影響を及ぼす因子として、温度と空気過剰率  $\lambda$  が挙げられる。 $\lambda$  が 1 (当量比) 近傍で NOx 生成は最大になり、それよりも大きくても小さくても燃焼温度は低下し NOx は減少する。通常ディーゼル機関では、燃料過剰 (リッチ) 状態で燃焼を行うことはすすの生成につながることから、燃料過剰領域を減少させることがエミッション改善策の主流となっている。しかしながら、DME では分子内に炭素同士の結合がなく、酸素原子が存在することなどから、酸素が不足してもすす等の生成がないという特徴がある。その特性を利用して DME において燃料リッチ燃焼を利用した NOx 低減の可能性を模索した。

図 1 に燃料リッチを利用した NOx 低減のコンセプトを示す。NOx 生成の多い当量比部分を減らすものとして、①EGR を行うことにより酸素濃度を低減しつつ混合気の局所  $\lambda$  分布をよりリッチ側としたとき、および②軽負荷において局所リッチを実現するために単噴孔ノズルと特異な形状の燃焼室 (以下、局所リッチ燃焼室) を組み合わせてリッチ領域とリーン領域に分離した場合の燃焼および排出ガス特性を解析し、NOx 低減の可能性を模索した。また EGR は DME 機関ではとくに有効な NOx 低減方策となりうる<sup>1)</sup> ことから、EGR による NOx 改善効果として他の要素も考

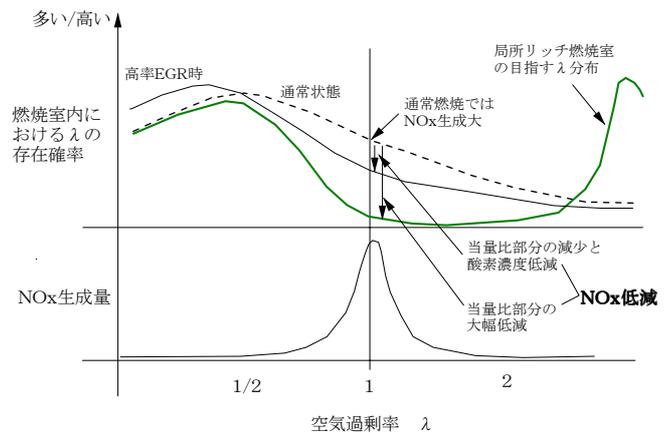


図 1 空気過剰率からみた局所リッチ燃焼の概念

慮しつつどの程度まで期待できるのかも併せて解析を行った。

## 2. 実験装置および実験条件

### 2. 1. 実験装置構成

図 2 に実験装置構成の概要を示す。供試機関には排気量約 1 L の単気筒ディーゼル機関を用いた。その諸元を表 1 に示す。供試機関は噴射系およびそれに伴う

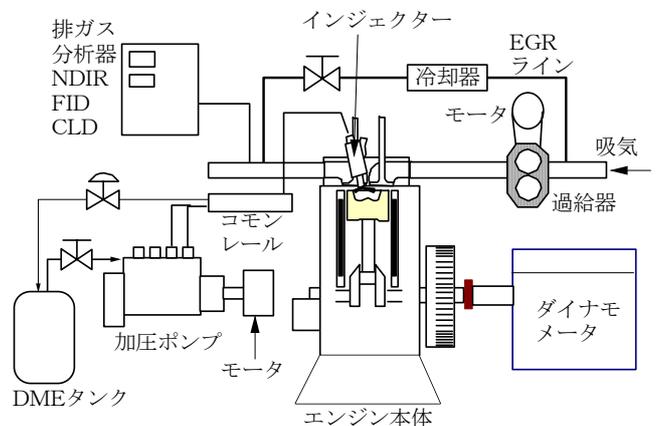


図 2 実験装置構成概要

シリンダヘッドの微少な加工を除いて軽油を使用するベース状態から変更を加えていない。噴射系はコモンレール式とした。DME の蓄圧部への加圧には別途電動機により駆動されるジャーク式列型噴射系のポンプを用いた。コモンレール圧力は最大 35MPa であるが、一部噴射量の少ない条件では 25MPa、あるいは 20MPa とした。インジェクタは磁歪素子により作動制御されるパイロット弁により、針弁に加わる燃料圧力を制御し噴射制御を行う方式である。ノズル噴孔径は通常燃焼室と用いたものは 0.5mm×5 噴孔、下記の局所リッチ燃焼室と用いたものについては 1.4mm の単噴孔とした。吸気系に関して EGR および局所リッチ燃焼室では過給を一部行った。過給器は容積型加圧装置を別途電動機により駆動するものである。EGR ガスおよび過給器により加圧したガス共に熱交換機により室温相当まで冷却され、吸気温度は常に一定としている。

燃料として用いる DME は、工業用(純度 99.9wt%)のものとし、燃料噴射ポンプ及びノズル部における潤滑性確保を目的として、添加剤(Lubrizol)を 800ppm 混合している。燃料消費量計測については、排出ガスの空燃比を空燃比計で測定し、カーボンバランス法を用いて算出した。実験結果における燃料消費率は正味出力に対するもので、軽油に換算した値である。

## 2. 2. 局所リッチ燃焼室

中、軽負荷領域においても確実な局所リッチ領域を作り出すことを目的として、標準のものと全く異なる形状の燃焼室を有する局所リッチ燃焼室ピストンを試作した。両者を比較した写真を図3に示す。この局所リッチ燃焼室では中央部に小さなキャビティを有し、その外側に空気だめがある。中央部キャビティ内



図3 実験に使用した標準ピストン(左)と局所リッチ燃焼用ピストン(右)

表1 供試機関諸元

Type	4-stroke, 1 cylinder
Combustion	Direct injection
Bore & Stroke, mm	108×115
Displacement, cm <sup>3</sup>	1053
Compression ratio	18.1
Injection system	Common rail
Nozzle diameter / number mm, #	φ0.5×5, φ1.5×1
Injection pressure, MPa	20-35

でリッチ燃焼を行ったあと、燃焼後期には外部空気だめの空気と混合して拡散燃焼が行われることとなる。中央部キャビティは全隙間容積の約 20%であり、全燃料がキャビティ内にとどまるとした場合 20%負荷程度でキャビティ内はほぼ当量比になる。この燃焼室を用いる場合には、燃料噴霧をキャビティ内にとどめるため下向きに噴射を行う単噴孔インジェクターを使用した。このインジェクターは噴孔径が大きく、噴霧の拡散が難しくなると考えられるため、これを用いる場合には、軽負荷条件においても 35MPa の噴射圧力を標準とした。

## 2. 3. 実験条件

実験はすべて定常運転にて行い、機関回転速度および負荷は、排出ガス試験で使用されるディーゼル 13 モードの中からいくつかの条件を採用した。その際、負荷率についてはベースディーゼル機関のスモークリミットとなる全負荷トルクを基準とし、回転数についてはベースディーゼル機関の定格回転数(3,200rpm)に対する割合で決定した。燃料噴射開始時期(以下、噴射時期という)は、それ自体をパラメータとする場合を除いて燃料消費率が最適となる値とした。したがって、同一運転条件でも EGR 率等が変化した場合には異なる場合がある。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1. EGR による NOx 低減効果解析(通常燃焼室)

#### 3. 1. 1. 吸気酸素濃度に対する NOx 低減効果

EGR は NOx 低減に大きなポテンシャルを有しており、その効果は主に吸気酸素濃度に依存する<sup>2)</sup>。各運転条件における吸気酸素濃度と EGR なしの場合を基準とした NOx 排出率の関係を図4に示す。吸気酸素濃度は排気酸素濃度と EGR ガス環流率から計算して求めている。また、図にはベースとした同型の軽油ディーゼル機関における吸気酸素濃度と NOx 排出率の

関係の一例を記載した。図4より、吸気酸素濃度が減少すると共にNOx排出率は大きく低減し、吸気酸素濃度15%以下では1/5以下のNOx排出率となっており、ほぼ100ppm以下のレベルになる。さらにEGRをかけた吸気酸素濃度12%以下では、20ppm以下の極めて低いNOx排出濃度となった。なお、40%負荷条件におけるそのときのEGR率は60%である。軽油ディーゼルの結果では吸気酸素濃度が17.1%までとなっているが、これは黒煙排出による限界であり、それのないDME機関ではEGRをかければかけるほど黒煙等の排出もなくNOxを極限まで低減できる可能性があることを示している。軽油ディーゼルと比較した場合、とくに大きな違いはなく、DMEにおいても同等のEGR効果があることがわかる。ただし、一部の条件においてNOx低減効果がDMEで低いケースもみられた。その要因として考えられることは、とくに軽負荷高率EGR時を中心に、最適噴射時期が進角したことが挙げられる。したがってEGR時でも進角する必要のなかった1920rpm、80%負荷で最も軽油ディーゼルに近いNOx低減率が得られている。

以上より、DMEエンジンにおけるEGRでは、高いEGR率とすることで劇的なNOx低減を可能とすることがわかった。

**3. 1. 2. 低λ時の燃焼特性** EGRによるNOx効果は基本的に吸気酸素濃度に依存するが、λの影響についても解析を行うこととした。そこで燃焼室内平均空気過剰率λとNOx低減率の関係について表したのが図5である。空気過剰率は1に近くなるほど変化が激しくなるため対数表示としている。この図を見ると当然ながら異なる負荷ではEGRなしの場合の空気過剰率が異なるが、EGRを行うことでλとNOx排出率はともに低減しながら、次第に収束していく。そして負荷によらずλが1.3以下では90%以上のNOx低減がみられた。このλではCOや排気温度の上昇により運転困難だった80%負荷でも他の結果の傾向から実際に運転可能ならば同様な結果となると推測される。このことは大量EGRによるNOx低減効果には酸素濃度の低下に加えて局所リッチによるNOx生成低減効果も加わっている可能性がある。EGRにより90%以上のNOx低減効果を図る場合には、吸気酸素濃度の代わりに空気過剰率（あるいは空燃比）を制御してλ<1.3となるような高率EGRを常に行うような手法をとることも考えられる。

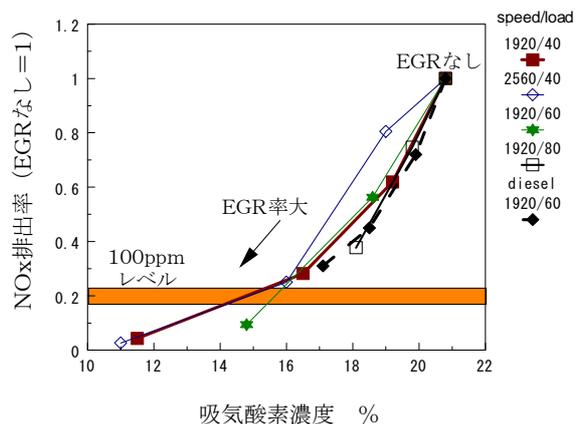


図4 各運転条件における吸気酸素濃度に対するNOx低減率

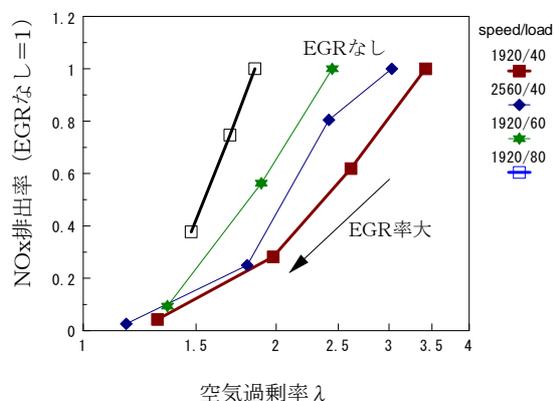


図5 各運転条件における空気過剰率とNOx低減率の関係

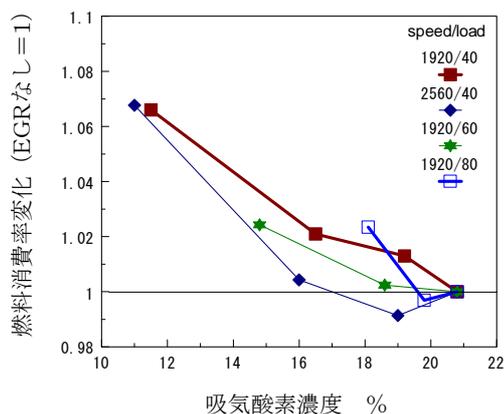


図6 吸気酸素濃度に対する燃料消費率変化

**3. 1. 3. 最適EGR率について** 以上より、常に低λを維持するような大量EGRを行えばNOxを極限まで低減することが可能である。しかしながら、DMEエンジンにおいて排出ガス低減とならび燃料消費率を確保することも重要である。そこで燃費等他のパラメータを考慮しながら、本実験における最適

EGR 率とそのときの NOx 低減幅を説明することを試みた。

図6は、各運転条件における吸気酸素濃度に対する燃料消費率を示したものである。図より、吸気酸素濃度が12%を下回る40%負荷率、EGR率60%の条件では6~7%の燃費悪化がみられた。この燃費の悪化を3%程度以下に抑えとした場合、高負荷である80%負荷率を除くと吸気酸素濃度16%が一つの目安となる。80%負荷率では18%で3%程度の悪化がみられたことから、このあたりがNOx低減とのトレードオフからみたほぼ最適値といえることができる。また、図7に吸気酸素濃度とCO排出濃度の関係を示す。CO排出濃度は負荷率により、ある酸素濃度以下になると急増し、その立ち上がりは負荷率が高いほど高い酸素濃度で始まる。また、同じ負荷率でも2560rpmでは1920rpmの約2倍の排出濃度となっており、回転数の影響も受けることがわかる。燃料消費率からみた最適EGR率、すなわち40~60%負荷で酸素濃度16%、80%負荷で18%とした場合のCO排出濃度は急激な立ち上がりよりは手前といえてよく、CO排出濃度からみてもほぼ最適値といえるレベルである。そのときのNOx低減率は図4より吸気酸素濃度16%では約75%、80%負荷率の吸気酸素濃度18%では約60%となっており、これが現実的見地からみたEGRによるNOx低減可能レベルと考えられる。

### 3. 2. 局所リッチ燃焼室を用いたNOx低減

**3. 2. 1. 局所リッチ燃焼室の基本特性** 局所リッチ燃焼室を用いた場合の排出ガスと燃料消費率を標準燃焼室と比較したのが図8である。図で示したのは1280rpm、20%負荷の条件である。NOxについては大幅な排出低減がみられたものの、COおよび燃料消費率は大幅に悪化した。これだけのNOx低減を行う場合、他の手法を用いても燃料消費率の悪化は避けられないが、今回の結果では約1.5倍もの悪化となっており、NOx排出レベルの如何によらず実用的とはいえない。

2つの燃焼室の気筒内圧力と熱発生率を図9に示す。噴射時期はそれぞれの条件における最適燃費点としているため熱発生率の立ち上がり時期が異なるが、局所リッチ燃焼室では熱発生率の最大値が低下して拡散燃焼部分も標準燃焼室時を下回る。代わりに燃焼終了時期が大幅に遅くなっており燃焼が悪化していることが予想される。質量燃焼割合10%~90%の期

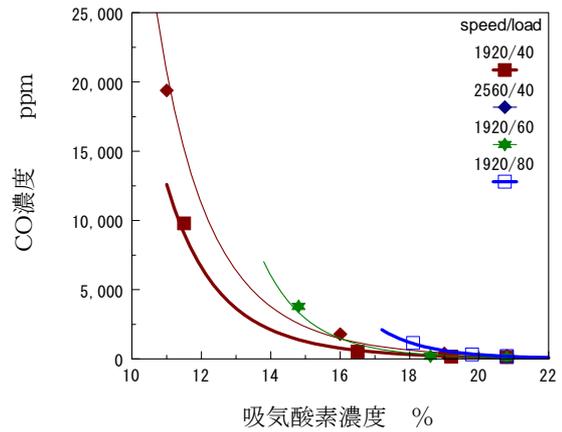


図7 吸気酸素濃度に対するCO排出濃度変化

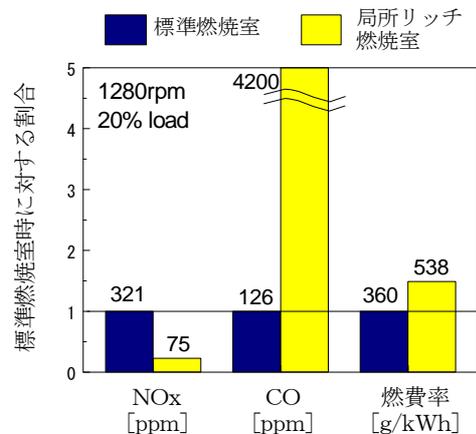


図8 局所リッチ燃焼室使用時のNOx、CO排出濃度および燃料消費率の標準燃焼室に対する割合

間とした主燃焼期間において標準燃焼室が19deg.CAであるのに対し、局所リッチ燃焼室では44deg.CAとなっており、燃焼が緩慢になったことがわかる。このことが局所リッチ燃焼室で燃焼後期に温度が低下してCOが増加し、燃費が悪化した主な要因になっていると考えられる。さらに負荷を高めた場合、40%程度の負荷率で燃料を増量してもCO排出と排気温度のみが上昇してトルクの増加にほとんどつながらない状況になった。現在使用あるいは研究されているDMEエンジンの多くはベースとした軽油ディーゼル機関と同等の出力が確保できていない。その要因として体積発熱量の低いDMEにて必要噴射量を確保することが困難であるという点があるが、上記で述べたような燃焼の悪化によりトルクが頭打ちになることも課題として挙げられている。ここで本燃焼室の燃焼悪化要因を解析することは、高負荷時の燃焼改善につながる可能性がある。

### 3. 2. 2. 燃焼悪化要因の解析

上記のような性能

悪化要因について、各種パラメータを変更した場合に、燃焼状況がどのような変化を示すか解析することとした。局所リッチ燃焼室におけるCO排出の増加および燃料消費率の悪化要因として、キャビティ内入が重要と考えられる。このことからキャビティ内のリッチ状態をさらに促進する方向に働くEGRと、緩和する方向になる過給を行った。それに加えて噴射圧力を35MPa→25MPaとした条件も行った。そこで各要素変数を変更した場合の燃焼状態の変化を図10に示す。燃焼状態を表す指標としてCO排出濃度と既述の主燃焼期間を用いることとした。まず50kPaの過給を行った場合、主燃焼期間は短縮している。この条件においてはキャビティ内全体ではやや空気過剰状態となり、過度な局所リッチ状態は改善されると予想される。それにもかかわらず、COの排出濃度はベースよりも上昇し、短縮したという主燃焼期間においてもその幅は小さく依然として標準燃焼室使用の場合の約2倍となった。一方、EGR40%条件においては、局所リッチがさらに進行してキャビティ内平均空気過剰率が約0.6まで低下する。その結果、CO排出については大幅な増加となったものの、主燃焼期間についてはベースからほとんど変化なく、極度な局所リッチ状態になっているにもかかわらず燃焼の悪化は微少なレベルにとどまっている。一方、噴射圧力を25MPaとしたときは、CO、主燃焼期間ともに大幅に増大している。キャビティ内の空気(酸素)量の増減よりも噴射圧力の影響のほうが大きいことは、キャビティ内がリッチ状態にあること自体よりも、噴射系その他の問題により、キャビティ内の空気さえも十分に利用できていないことが燃焼悪化の原因と考えられる。それについて気筒内圧力と熱発生率より解析を行うこととした。図11は局所リッチ燃焼室を用いたベース、噴射圧力25MPa、50kPa過給時の3条件について示している。噴射圧力を25MPaとした場合の噴射期間の増加は約0.2msで、1280rpmでは1.5deg.CA程度となり性能に影響するほど顕著なものではない。しかしながら予混合燃焼部分について立ち上がりの傾き、最大値ともに低下した。活発な拡散燃焼の困難な局所リッチ燃焼室を用いて予混合燃焼が緩慢になったため燃焼全体の悪化につながったと考えられる。このことから噴射圧力の上昇による燃料噴霧の拡散向上効果は本実験においてきわめて大きな影響をもつといえる。一方、過給時においては当然ながら気筒

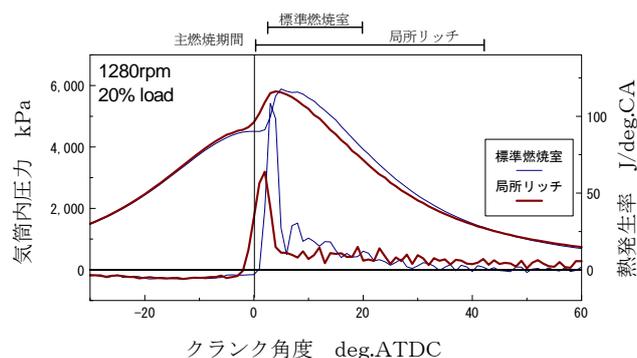


図9 標準および局所リッチ燃焼室使用時の気筒内圧力および熱発生率挙動

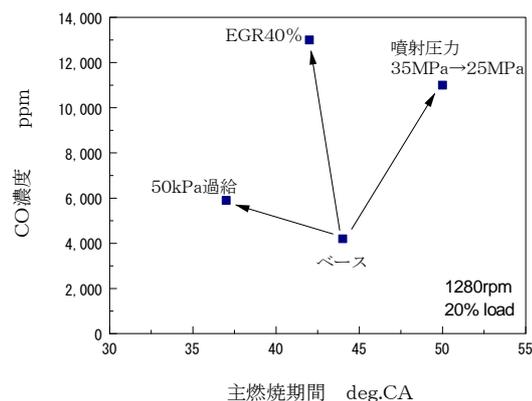


図10 各種要素変数変更による主燃焼期間およびCO排出濃度変化

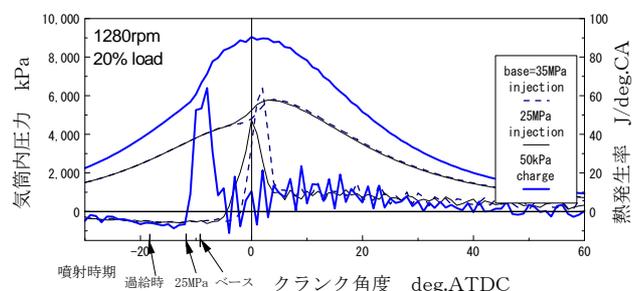


図11 局所リッチ燃焼室における各種要素変数変更時の気筒内圧力および熱発生率挙動

内圧力が高くなるがその最大値がほぼ上死点付近となり、熱発生率の約半分が上死点以前に行われている結果となった。熱発生が上死点以前の圧縮行程中に行われることは、一部は負の仕事をしたことになり、通常であればサイクル全体の熱効率を低下させる方向に働く。しかしながら過給条件においては図で示した場合がもっとも燃費率のよかった噴射時期としたものである。そのような結果になった要因として、インジェクターからの燃料噴射と燃焼室形状の関係が考えられる。その影響について検証する一つの方法とし

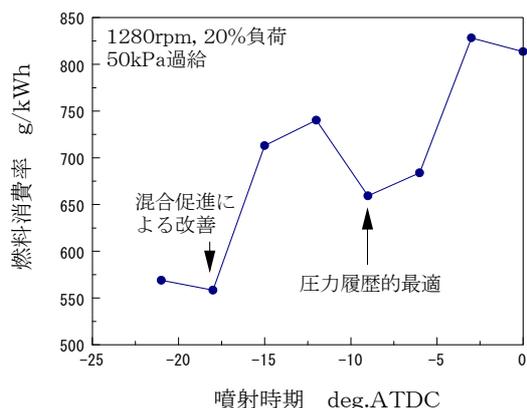


図 12 局所リッチ燃焼室を用いた噴射時期に対する燃料消費率変化

て、図 12 に局所リッチ燃焼室で過給を行った場合の噴射時期と燃料消費率の関係を示す。図から極小値が二つ存在することがわかる。一つは上死点前 9deg.CA で、もう一つは最適燃費率となった上死点前 18deg.CA である。本燃焼室では小キャビティを有していることもあり、上死点にピストンが位置するときにはインジェクター先端とキャビティ底面との距離がきわめて小さく 1mm を下回る部分がある。上死点前 9deg.CA 程度ですでにインジェクター噴孔とキャビティ底面がきわめて接近しているためキャビティ内における燃料と空気の混合さえ困難であると考えられる。そのような混合が阻害された状況の中で圧力履歴や熱力学的に最適な燃料消費率になったのが上死点前 9deg.CA の極小値といえる。一方最適値となった上死点前 18deg.CA ではピストンが 2mm 以上下がっていることになり燃料噴霧がより広がった形で衝突し、その後の拡散が向上すると考えられる。そのため通常では燃費の悪化するような大幅に進角した条件でもむしろ燃費が向上する結果となった。

このことから局所リッチ燃焼室における性能悪化は、単噴孔ノズルの噴射特性と燃焼室の形状から、燃料と空気の混合がうまくいかず、行き過ぎたリッチ領域と空気みの領域が存在したためと考えられる。今回の実験では、噴霧をキャビティ内にとどめることを重視して単噴孔ノズルを用いたが、混合促進を重視して多噴孔ノズルを用いることや、燃料噴霧と燃焼室形状の関係を最適化してそのような行き過ぎたリッチ状態を解消することでできれば、本コンセプトを用いた場合の性能向上は可能と考えられる。

#### 4. まとめ

1. DME 機関における EGR はきわめて有効で、中負荷において黒煙の排出なしに 20ppm 以下の NOx 排出レベルが可能となった。EGR の効果は軽油ディーゼルに適用した場合とほぼ同等で、吸気酸素濃度との相関が高い。
2. 中負荷においては吸気酸素濃度 16%、高負荷においては 18% とすると、CO、燃費率の悪化を最小限に押さえつつ NOx 低減を図ることができる。そのときの NOx 低減効果は EGR なしの場合からそれぞれ 75 および 60% 程度を期待できる。
3. 小口径キャビティ内でリッチ燃焼を行う局所リッチ燃焼室においては大幅な NOx 低減効果が見られたものの CO および燃料消費率の悪化が著しかった。
4. 上記について、空気量よりも噴射圧力の影響が大きいことから、局所リッチであること以上に今回の実験では燃料と空気の混合に問題があると予想された。それらの最適化が図られれば改善の余地がある。またこれは既存 DME 機関で高負荷性能の確保が困難である原因を示唆していると予想される。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、実験に関する設備関係および実施面で多大な協力いただいた小林啓樹氏および局所リッチ燃焼室ピストンの製作を引き受けていただいた日産ディーゼル株式会社に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 佐藤由雄ほか、第 29 回交通安全公害研究所発表会講演概要 p83-86, 1999
- 2) 鈴木央一ほか、自動車技術会論文集 Vol.26 No.3 p33-38, 1995