

DMEを燃料とするクリーンディーゼルエンジンの研究

- コモンレール式燃料噴射の噴射特性が排出ガスに及ぼす影響 -

環境エネルギー部
吉林大学

佐藤 由雄 野田 明
李 君

1. はじめに

大都市部の大気汚染は依然として厳しい状況にあるため、大気汚染への寄与率の高いディーゼル車から排出されるPM及びNO_x等をゼロエミッションレベルに近づける必要がある。その可能性のひとつとしてジメチルエーテル(DME)を大型車の燃料として用いた次世代型低公害車の技術開発が提案されている⁽¹⁾。DMEは天然ガスと比べて常温・低圧(0.5MPa程度)で液化し、LPガスなみの取り扱いが可能である。また、含酸素燃料であるDMEはPMの発生が極めて少ないため、大量EGRによるNO_xの大幅低減が行える⁽²⁾。しかも圧縮着火が容易でディーゼル燃焼が可能のため、燃費すなわちCO₂低減と航続距離の点でも有利である。

本研究ではDMEを燃料とするディーゼルエンジンの可能性と技術的課題を調べることを目的とする。本報ではコモンレール式燃料噴射装置を用い噴

射単体試験によりDME噴霧の巨視的観察や噴射率測定を行うとともに、それら噴射特性が排出ガスに及ぼす影響をエンジン実験により調査し、未燃成分やNO_x等の低減策について実験的検討を行った。

2. 実験装置及び方法

2. 1. コモンレール式燃料噴射装置

本装置はDME単気筒エンジン実験用に試作したもので、図1の左上部に示すように、DMEは工業用の高圧ポンプにより加圧されコモンレール部において供給圧力を調整した後、インジェクターより噴射される。表1に実験に使用した噴射系の諸元を示す。インジェクターは針弁を直接電磁駆動する方式のもので、今回の実験ではインジェクター入口の燃料圧力(以下、噴射圧力という)を15MPa(設計圧力)一定とした。また、DMEエンジンではディーゼルと同等の出力を得るために約1.8倍の噴射量が必要

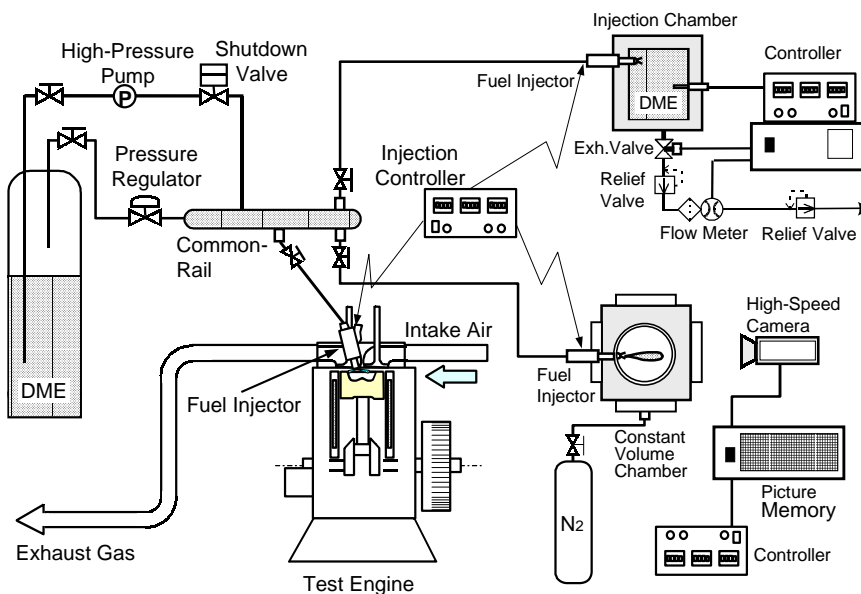


図1 噴射特性試験及びエンジン実験装置の概要

表1 エンジン・噴射系の主要諸元

	DME Engine	Diesel Engine
Swept Volume, cm ³	1053	←
Engine Type	Single Cylinder / 4-Stroke	←
Combustion Type	Direct-Injection	←
Comb. Chamber, mm	55 / Troidal	←
Bore / Stroke, mm	108/115	←
Compression Ratio	18.1	←
Swirl Ratio	3.0, 2.1, 1.5	2.1
Fuel Injection System	Common-Rail	In-Line
Injector	Electromagnetic	Mechanical
Needle	Direct Drive	Oil Pressure Drive
Nozzle Type	Multiple-Hole	Multiple-Hole
Nozzle-Hole		
mm x Number	0.55 x 5, 0.70 x 3	0.29 x 5
Total Area, mm ²	1.10	0.33
Nozzle Lift, mm	0.09, 0.12, 0.14	0.3
Inj. Pressure, MPa	15 [Common-Rail P.]	25 [Opening P.]

となる。噴射期間を増加させずに噴射量を確保するため、DMEの噴射ノズルの総噴孔面積をディーゼルノズルの3.3倍に増やした。

2.2. 噴射特性試験

DMEの噴射過程の特徴を調べるため噴霧の先端到達距離および噴霧角を計測した。実験には図1の右下部に示すように撮影用の石英窓を付けた定容容器を用い容器内に窒素を充填し、常温高圧雰囲気中にDMEを噴射した。高速度ビデオカメラを用い9000FPSおよび4500FPSの撮影速度で非燃焼噴霧のシュリーレンおよび直接撮影を行った。比較のため、同じコモンレール式燃料噴射装置を用いて市販のJIS2号軽油による噴射実験を実施した。

また、噴射率測定には図1の右上部に示すZeuchの測定原理による噴射率計を用いた⁽³⁾。噴射率は噴射ノズルの針弁リフト量を表1に示す3段階に調整して変更した。測定に際してはエンジンシリンダー内圧力にほぼ等しい4MPaの背圧を設定するとともに、予めDMEの体積弾性係数の測定を行ない、圧力、温度に対する補正係数を求めた。

2.3. 単気筒エンジン実験

エンジン実験にはベースエンジンとして表1に示す排気量1053cm³の単気筒直接噴射式ディーゼルエンジンを用い、シリンダヘッドを改造してDME用のインジェクターを取付けた。燃料として工業用のDME(純度99.9wt%)を使用し、潤滑剤等は添加していない。スワール比の変更は吸気ポート内に流路調整板を挿入して行った。エンジン実験は回転速度1280rpm、噴射時期-8deg.ATDC一定で行い、低噴射量条件として64mm³/str.(; 3.2)、また、

高噴射量条件として113mm³/str.(; 1.7)を選定した。排出ガスについてはCOをNDIR、NO_xについてはCLD、THCはHFIDの各方式で測定した。THC測定値は感度補正無しで示した。

3. 実験結果と考察

3.1. 噴射特性試験

3.1.1. DME噴霧の特徴 噴孔径dn; 0.5mmの単噴孔インジェクターを用い、噴射圧力および噴射量一定の条件でDMEと軽油の噴射過程を比較した。両燃料における噴射期間中の噴射圧力変化はほぼ同じであった。図2に容器内圧力を2、3、4MPaとし

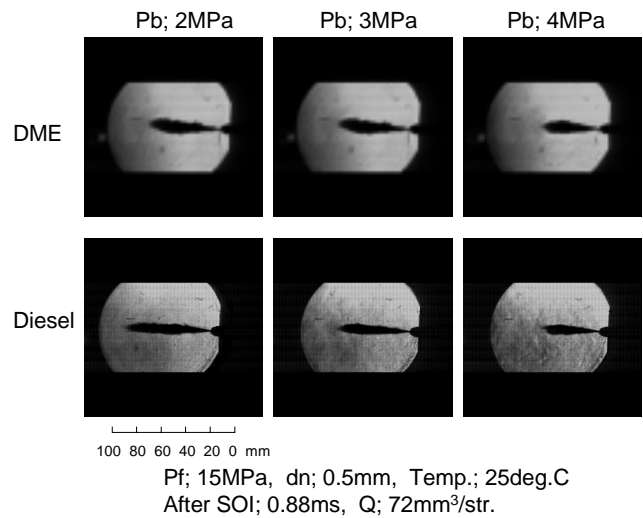


図2 噴霧のシュリーレン撮影写真

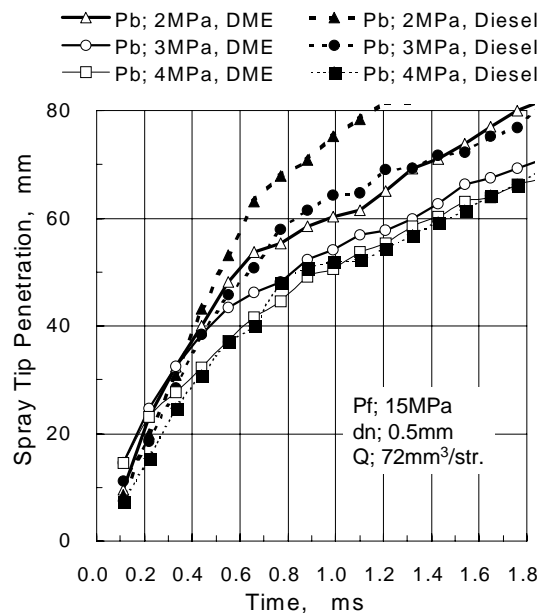


図3 噴霧到達距離の比較

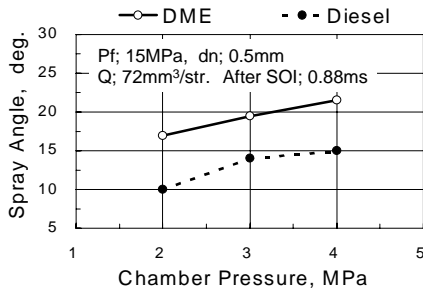


図4 噴霧角の比較

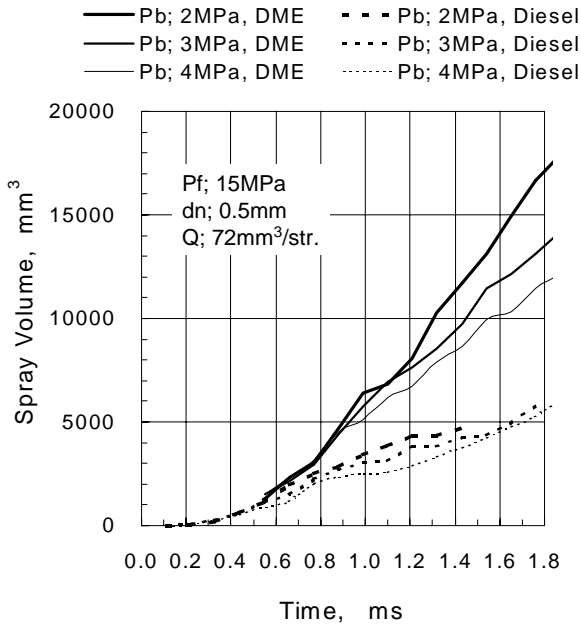


図5 噴霧体積の比較

た場合の噴射開始から 0.88ms 後の噴霧のシュリーレン写真を示す。また、DME と軽油の噴霧到達距離と噴霧角を比較した結果を図3および図4に示した。DME 噴霧の先端到達距離は噴射開始直後では軽油噴霧とほぼ同じであるが、ブレイクアップ (0.8ms 前後) 以降では小さくなる。雰囲気圧力の増加とともにその違いは少なくなる。また、DME 噴霧の周囲は乱れが大きく、噴霧角は軽油の約 1.5 倍であった。この結果、図5に示すように噴霧体積の時間的変化は、DME では 0.8ms 位から急速に噴霧体積が増加するが、軽油では体積増加の変化が緩やかである。また、DME の噴霧体積は軽油より大きい、容器内圧力を高くするとブレイクアップ以降の体積増加が抑制されることが分かる。

以上の結果から、DME は軽油と比べて噴霧の到達距離は小さいが噴霧角が広いいため体積膨張が大きくなる。これは、DME は軽油より粘度と表面張力

が小さく蒸気圧も高いため噴流がより微細な液滴に分裂するためと考えられる。

3. 1. 2. ノズル噴孔数・径の検討 ベースにしたディーゼルエンジンの $dn; 0.29\text{mm} \times 5$ 噴孔ノズルを基準とし、噴孔数を変えずに総噴孔面積を拡大した $dn; 0.55\text{mm} \times 5$ 噴孔ノズルならびに噴霧到達距離の増大を意図して噴孔数を減らし噴孔径を増加させた $dn; 0.70\text{mm} \times 3$ 噴孔ノズルの2種類の高噴孔ノズルを実験に用いた。

3. 1. 3. 噴霧に及ぼすノズル噴孔数・径の影響 噴射量一定条件で $dn; 0.55\text{mm} \times 5$ 噴孔ノズルと $dn; 0.70\text{mm} \times 3$ 噴孔ノズルの噴霧の違いを調べた。図6に噴射初期の噴霧発達過程を直接撮影した写真を示す。3噴孔ノズルの噴霧到達距離は5噴孔ノズルの約 1.3 倍、噴霧角は約 2 倍であった。図7に噴霧全体の体積の時間的変化を示す。3噴孔ノズルの総噴霧体積は噴射直後で5噴孔ノズルの約 9 倍に増大しその後は 3 倍程度で一定となる。これは、噴孔径

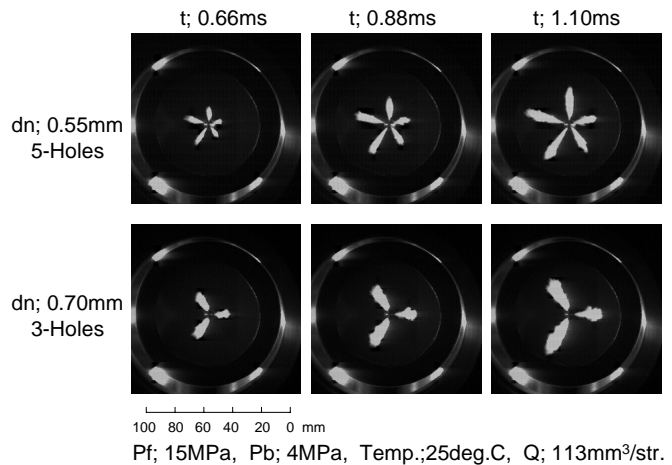


図6 5噴孔及び3噴孔ノズルの噴霧の直接撮影写真

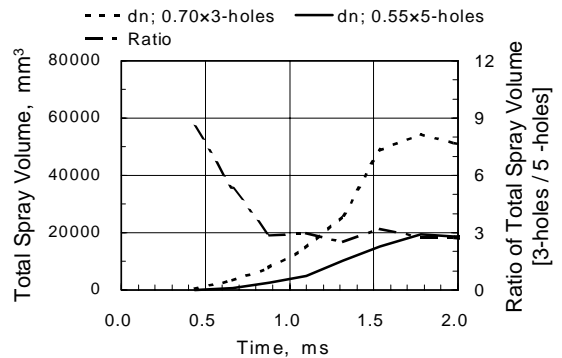


図7 5噴孔及び3噴孔ノズルの総噴霧体積

の大きい3噴孔ノズルは5噴孔ノズルと比べて噴霧粒径が大きく燃料蒸発が遅いことによるものと考えられる。

3. 1. 4. 噴射率の測定 試作したコモンレール式燃料噴射装置においてインジェクターのノズルリフト量を変更し、背圧を4MPa一定とし噴射量を揃えた条件で噴射率形状を測定した結果を図8に示す。インジェクターの構造上、噴射率を大幅に変更することが困難であったが、低噴射量及び高噴射量条件においてそれぞれ異なる平均噴射率（噴射量/噴射期間、以後、噴射率と称す）を得た。

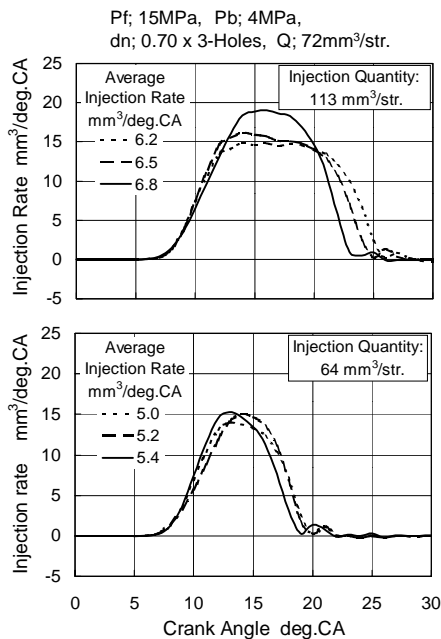


図8 噴射率の測定結果

3. 2. 単気筒エンジン実験

3. 2. 1. 5噴孔と3噴孔ノズルの排出ガス特性 図9に5噴孔と3噴孔ノズルをエンジンに用いた場合のHC、COおよびNOx排出特性を調べた結果を示す。5噴孔ノズルのHCとCOは、低噴射量時では十分低いが、噴射量の増加とともに増大する。3噴孔ノズルでは全体的にHCが高いが噴射量の増加とともに減少する。また、高噴射量時では5噴孔ノズルの場合と比べCOの増大が抑制される。

図10に、5噴孔および3噴孔ノズルの熱発生率を示す。5噴孔ノズルでは3噴孔と比べて予混合燃焼における熱発生率が増加する。これは、噴霧周囲の液滴がより微細化され燃料蒸発が活発なことを示す。しかし、5噴孔ノズルの場合は噴霧間角度が狭

く噴霧長さも短いため、噴射量の多い場合には噴霧周囲の燃料蒸気同士の干渉により噴霧火炎内部への空気導入が阻害されCOが増大する。一方、噴孔径の大きい3噴孔ノズルでは予混合燃焼が抑制される。3噴孔ノズルではHCが増大することから5噴孔ノズルと比べて噴霧の液滴径が大きく燃料蒸発が抑えられると考えられる。しかし、噴霧間角度が広

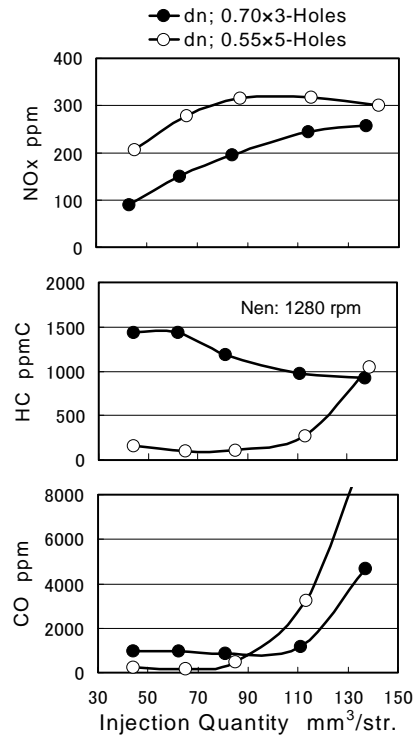


図9 5噴孔及び3噴孔ノズルの排出ガス特性

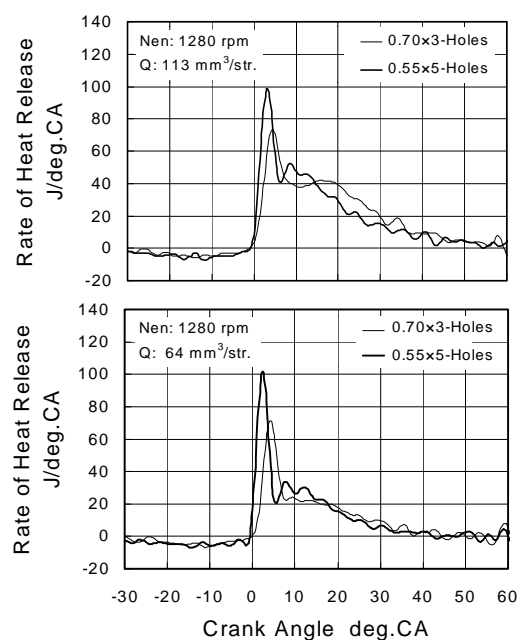


図10 5噴孔及び3噴孔ノズルの熱発生率

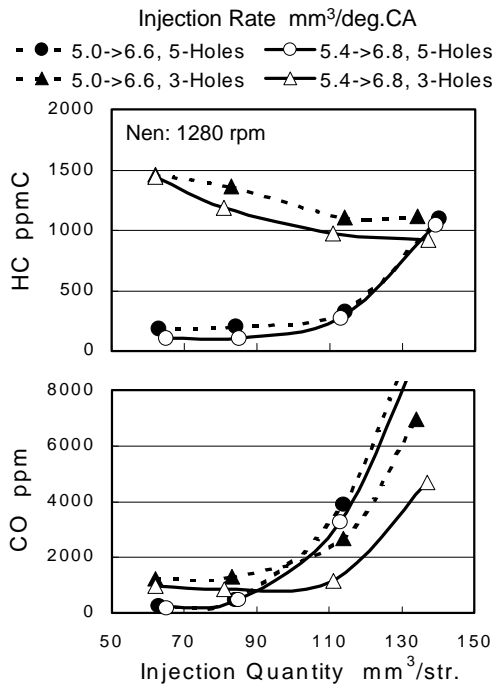


図11 CO 及びHCに及ぼす噴射率の影響

く噴霧到達距離も増加するため、高噴射量時では5噴孔ノズルのような噴霧火炎内部の空気不足が生じにくく、5噴孔ノズルと比べてCOの増大が抑制されると考える。

以上より、COとHCの低減には低噴射量運転では噴霧液滴を微細化し予混合燃焼を活性化させる必要があるが、高噴射量運転時には過度の燃料蒸発を抑え噴霧間角度を広く噴霧到達距離を増加させて空気利用率の向上を図ることが重要である。

3. 2. 2. 噴射率の影響 噴射率がHCとCOに及ぼす影響を調べた結果を図11に示す。5噴孔ノズルでは噴射率の影響は少ない。3噴孔ノズルでは噴射率を高めると全体的にHCとCOが減少する。図12に着火遅れと燃焼期間の変化を示す。噴孔径の大きい3噴孔ノズルでは噴射率を増加させると霧雰気との相互作用により噴霧液滴が適度に微細化されるが、それにともない着火遅れ期間も大きくなるため燃料と空気との混合が促進され燃焼期間が短縮される。

3. 2. 3. スワール比の影響 図13に、高噴射量時においてスワール比がHC、COおよびNOxに及ぼす影響を調べた結果を示す。3噴孔ノズルではスワール比の影響は少ないが、5噴孔ノズルではスワール比の増加とともにHCとCOが大幅に低減した。

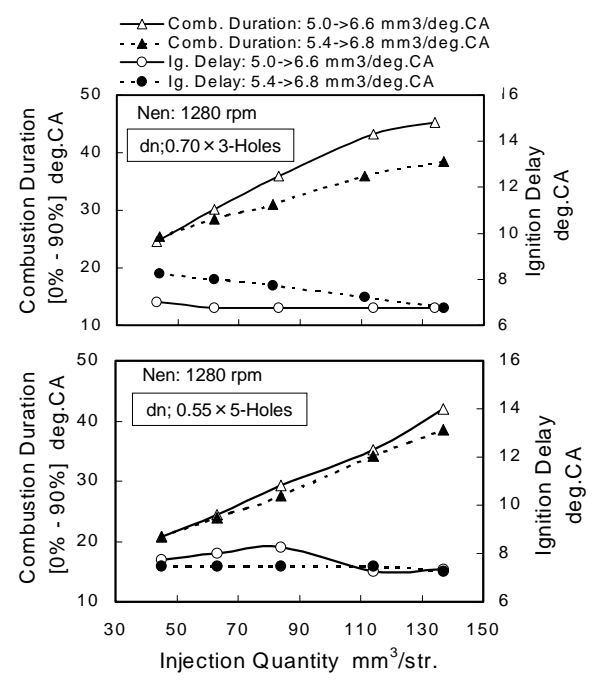


図12 燃焼特性値に及ぼす噴射率の影響

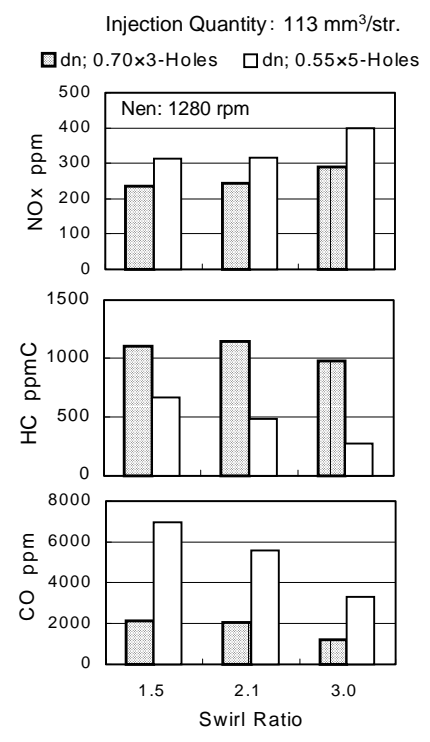


図13 排出ガスに及ぼすスワール比の影響

図14に、着火遅れおよび燃焼期間の変化を示す。5噴孔ノズルではスワール比の増加により着火遅れ期間が長くなる。また、噴霧周囲の燃料蒸気をはぎ

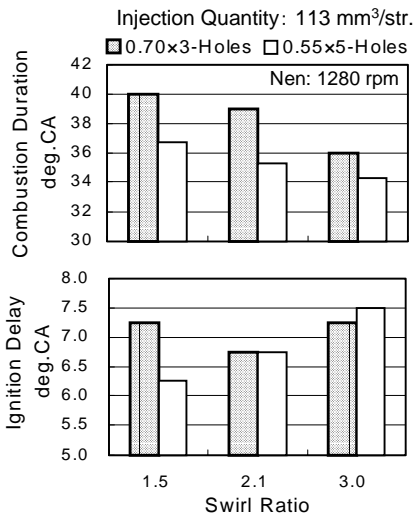


図14 燃焼特性値に及ぼすスワール比の影響

取る効果も大きくなるため、この両効果により噴霧火炎内への空気導入が促進されると考える。

3. 2. 4. NO_x 排出量とエネルギー消費率の比較 図15に、回転速度 1280rpm、噴射時期 - 8deg.ATDC一定でDME運転を行い5噴孔と3噴孔ノズルのNO_x 排出量とエネルギー消費率の関係を調べた結果を示す。両ノズルでは、高噴射率化と高スワール比にともないNO_x 排出量が増加し、エネルギー消費率が低減する。低噴射量時では5噴孔と3噴孔ノズルはNO_x 排出量とエネルギー消費率のトレードオフのライン上に位置している。3噴孔ノズルを用いた場合、高噴射量時の燃焼は拡散燃焼が主体となるため5噴孔ノズルと比べてNO_x 排出量が減少する。

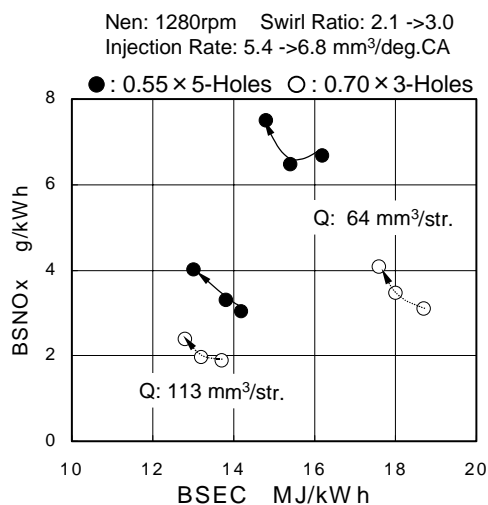


図15 NO_x 排出量とエネルギー消費率の関係

4. まとめ

コモンレール式燃料噴射におけるDMEの噴射特性を調べた。また、単気筒直噴ディーゼルエンジンをDME運転し、噴射ノズルの噴孔径・数、噴射率及びスワール比が排出ガスに及ぼす影響を調べた結果、以下の知見が得られた。

(1) DME噴霧は軽油噴霧と比べてより微細な液滴に分裂するため噴霧の到達距離は小さいが、噴霧角が増加するため体積膨張が大きくなる。

(2) COとHCの排出を抑制するためには、低噴射量運転では噴孔径の小さい5噴孔ノズルを用い噴霧液滴を微細化し予混合燃焼を活性化させる必要がある。高噴射量運転時には噴孔径の大きい3噴孔ノズルにより過度の燃料蒸発を抑え噴霧間角度を広く噴霧到達距離を増加させて空気利用率の向上を図ることが重要である。

(3) 高噴射量運転時のCOとHCの低減には、5噴孔ノズルではスワール比の増加が、また、3噴孔ノズルでは高噴射率化が有効であった。

(4) 3噴孔ノズルの場合、高噴射量運転時では拡散燃焼が主体となるため5噴孔ノズルと比べてNO_x 排出量が減少する。

参考文献

- (1) 「低公害車開発普及アクションプラン」, 経済産業省・国土交通省・環境省, 平成13年7月11日
- (2) Yoshio Sato, Akira Noda, Takashi Sakamoto and Yuichi Goto : Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging, SAE Paper 2000-01-1809.
- (3) Tadashi IKEDA, Yukimitsu OHMORI, Akio TAKAMURA, Yoshio SATO, LI Jun and Takeyuki KAMIMOTO : Measurement of the Rate of Multiple Fuel Injection with Diesel Fuel and DME, SAE paper 2001-01-0527.