

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によるエンジン性能と排出ガスの基本特性 -

佐藤 由雄*

Study of a Clean Diesel Engine Fueled with Dimethyl Ether

- Engine Performance and Basic Characteristic of Emissions using Common Rail Fuel Injection -

by

Yoshio SATO*

Abstract

An experimental investigation was carried out on engine performance, combustion characteristics and possibility of exhaust emissions reduction in using Dimethyl Ether (DME) for diesel engines. Single cylinder direct-injection diesel engine of displacement of 1.05 liter was used as a base engine, and common rail type DME injection system was installed. The power of the DME engine using supercharging with EGR was higher than that of the diesel engine. By high EGR rate, NO_x emission was reduced to about 1/3 of the diesel engine without deterioration of combustion. Smoke emission was not completely exhausted. CO₂ emission from the DME engine was equal to the diesel engine.

原稿受付：平成 15 年 9 月 16 日

* 環境研究領域

1. まえがき

大都市の大気環境を改善するため、ディーゼル自動車から排出される微粒子（以下、「PM」と称す）とNO_xを大幅に低減することが緊急の課題である。また、地球温暖化を防止する観点から、自動車から排出されるCO₂の削減が求められており、燃費低減と排出ガス対策との両立が必要とされている。

最近、ディーゼルエンジンのPM問題を抜本的に解決する方法の一つとして、ジメチルエーテル（以下、「DME」と称す）をディーゼルエンジンの燃料に用いることが注目されている。DMEは圧縮着火が容易で含酸素燃料であるため黒煙が排出せずPMの排出も極めて少ないことから、ディーゼルエンジンの高効率性を活かしつつ低エミッション化できる可能性が高く、ディーゼル自動車の低公害・代替燃料として有望視されている。

このようなDMEの燃料特性に着目し、国内外においてDMEを用いたディーゼルエンジンに関する研究開発が進められている。これらの研究の多くは従来のディーゼル噴射装置を用いてDMEの筒内噴射を試みているが、DMEは沸点が-25℃と低く、また、軽油と比べて蒸発し易い、粘度が低い、体積弾性係数が小さい（圧縮性が高い）、低位発熱量が約2/3などの燃料性状により、要求燃料噴射量の確保やリターン燃料の処理、摺動部の摩耗や漏れへの対策などに関わる技術的問題点が指摘されている¹⁾²⁾。

本研究では、単気筒直接噴射式ディーゼルエンジンをベースに、これに試験用のコモンレール式燃料

噴射装置を用いてDMEの筒内噴射を試み、エンジン性能及び排出ガスの基本特性について調べた。また、含酸素燃料であるDMEの利点を活かして大量EGRを行い、DMEエンジンにおけるNO_xの大幅低減の可能性について調査した。

2. DMEの燃料性状

DMEの燃料性状を天然ガス、メタノール及び軽油と比較してTable.1に示す。DMEはメタノールに次いで酸素含有率の高い燃料であり、C-C結合を有していないため黒煙が生成されない。PMの排出も極めて少なく硫黄分も存在しないことから排気系に触媒を用いる場合の問題点は少ない。

自己着火温度が低く、通常のディーゼルエンジンにおいて圧縮着火が可能である。LPGと同様に常温・常圧では気体であるが5気圧程度で液化し低圧用シリンダーに充填できるため可搬性は天然ガス等と比べて容易である。また、低位発熱量は軽油の約7割とエネルギー密度も高く中・長距離走行用のトラック・バス用燃料としても期待できる。エンジンへの燃料供給が液体で行える利点があるが、圧縮性が高く蒸気圧が高いこと、さらに、粘度が低いことへの対策が必要である。

3. 実験装置及び方法

実験にはベースエンジンとしてTable.2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、実験用のコモンレール式燃料噴射装置

Table. 1 Fuel Properties

	DME	CNG	Methanol	Diesel Oil
Chemical Structure (Average)	CH ₃ -O-CH ₃	CH ₄	CH ₃ OH	(C ₁₆ H ₃₄)
C (% wt.)	52.2	75	37.5	85
H (% wt.)	13	25	12.5	15
O (% wt.)	34.8	0	50	0
Liquid Density (kg/m ³)	667	-	795	831
Stoich. A/F Ratio	9.0	16.86	6.46	14.6
Boiling Point (°C)	-24	-162/-89	66	180/371
Kinematic Viscosity (cSt)	0.25	-	0.75	2.5/3.0
Modulus of Elasticity (N/m ²)	6.37E+08	-	-	1.49E+09
Lower Carorific Value (MJ/kg)	28.8	49	19.8	42.7
Ignition Limits (% Gas in)	3.4/18.6	5/15	5.5/26	0.6/6.5
Vapour Pressure [293K] (kPa)	530	-	37	-
Auto Ignition Temperature (°C)	235	650	450	250
Heat of Vapourisation (kJ/kg)	467	510	1110	300

Table. 2 Engine Specifications

	Diesel Engine	DME Engine
Swept Volume (cm ³)	1053	
Engine Type	Single-Cylinder / 4-Stroke	
Combustion Type	Direct Injection	
Combustion Chamber	Troidal	
Bore/Stroke (mm)	108/115	
Compression Ratio	18.1	
Swirl Ratio	2.07	3.0
Fuel Injection System Injection Nozzles	Coventional Injection Hole-Type 0.29×5-Holes	Common-rail Electromagnetic Type 1.00×1-Hole 0.41×6-Holes
Injection Pressure (MPa)	20	10, 12.5, 15, 17.5

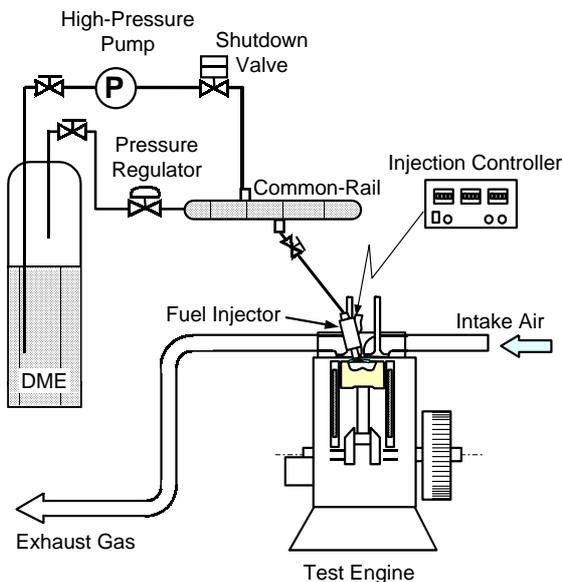


Fig.1 Fuel Injection Equipment

のインジェクターを組み込むためシリンダヘッドのみを改造した。Fig. 1 に燃料噴射装置の構成を示す。コモンレール式噴射装置はDMEの高圧供給装置とインジェクターとから構成される。DMEは可搬用の容器(120L)から液体で取り出され、高圧ポンプにより加圧(最大20MPa)され、コモンレール部において供給圧力が調整された後、電磁駆動方式のインジェクターによりシリンダー内に噴射される。インジェクターはガソリン筒内噴射用のインジェクターをベースにDME用に改造したもので、ソレノイドへの通電により針弁を直接リフトさせる方式である。噴射ノズルは燃焼室に対してほぼ等間隔の6噴孔ノズルと燃焼室底面に向かってやや斜め方向から噴射する単噴孔ノズルの2種類(両者の開口面積

は同一)を比較した。噴射期間はインジェクター入口部配管内の燃料圧力の変化から推定した。燃料として工業用のDME(純度99.9wt%)を使用し、今回の試験では潤滑性向上剤等を添加していない。軽油は市販のJIS2号軽油を用いた。

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。過給には外部駆動の機械式過給機を用い、水冷式のインタークーラーを組み込んだ。EGRを行う場合には排気絞りを併用しEGRガスは過給機の入口側に環流させた。EGR配管の途中に水冷式クーラーを取り付け給気温度の上昇を抑制した。DMEの消費流量は、排気空燃比計により測定した空気過剰率(以下、「 λ 」と記す)と吸入空気量測定値から算出した。排出ガスについてはCOをNDIR、NO_xをCLD、THCはHFIDの各方式で測定した。THC測定値は未燃のDMEに対する感度補正を行わない値で示した。

4. 実験結果及び考察

4.1. エンジン性能と排出ガスの基本特性

4.1.1. インジェクター噴孔数の影響

DMEエンジンではディーゼルエンジンと同等の出力を得ようとするとき体積ベースで約1.9倍程度の噴射量が必要となる。また、燃焼室内に噴射されたDME噴霧の微粒化、蒸発、混合過程については不明な点が多く、どのような噴射方法が適切であるか事前に検討する必要がある。そこで、はじめにホールタイプの6噴孔インジェクタと単噴孔インジェクタ(両者の開口面積は同一)を用い、噴射圧力を15Mpaとしてエネルギー消費率及び排出ガス特性の比較を行った。

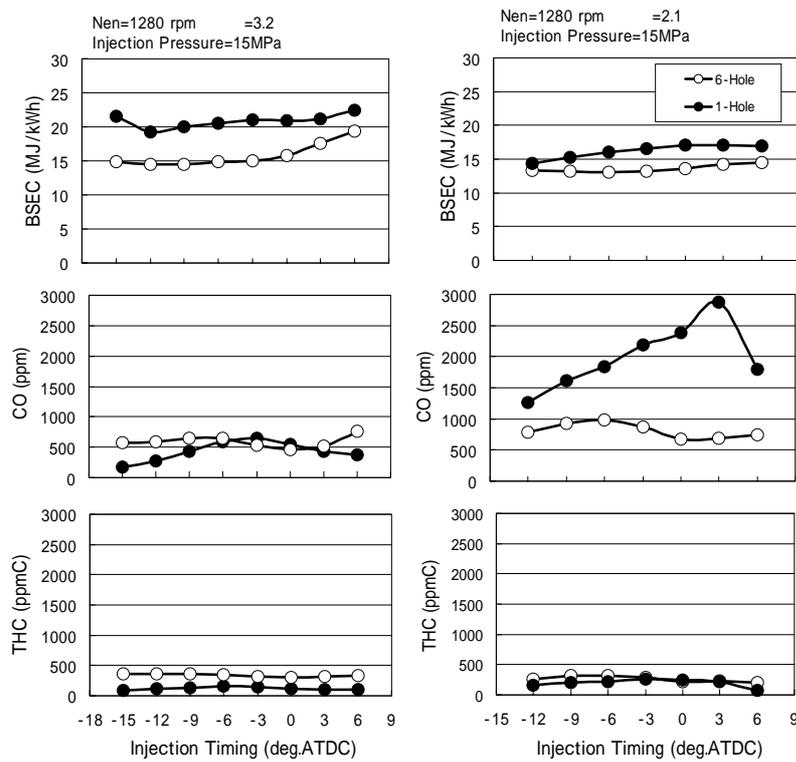


Fig.2 Effects of Injector Holes

Fig. 2にエンジン回転速度 1280rpm において、 $\phi=3.2$ 及び $\phi=2.1$ 一定で運転し噴射時期の影響を調べた結果を示す。単噴孔インジェクターを用いた場合、噴射量の少ない $\phi=3.2$ の条件では6噴孔インジェクターと比べてTHCの排出がやや少ないが、 $\phi=2.1$ の条件では噴射時期が上死点近傍に近づくとしたがつてCOが急増した。6噴孔インジェクターは単噴孔インジェクターと比べてエネルギー消費率が良好で、噴射時期に対する排出ガステ性的変化も比較的少ない。コモンレール圧力が比較的低い場合、噴射量の多い運転条件で単噴孔インジェクターを用いるとDME噴霧の分散性が悪く空気とDMEとの混合が悪化すると考えられる。この結果をふまえ、以降の実験では6噴孔インジェクターを用いることとした。

4.1.2. 噴射圧力の影響

Fig. 3 に6噴孔インジェクタを用い、エンジン回転速度 1280rpm、噴射時期 -3deg.ATDC 一定で噴射圧力がエネルギー消費率及び排出ガスに及ぼす影響を低負荷と中負荷の運転条件において調べた結果を示す。

低負荷では噴射圧力の影響は比較的少ないが、中負荷では 15MPa 程度まで噴射圧力を増加させると

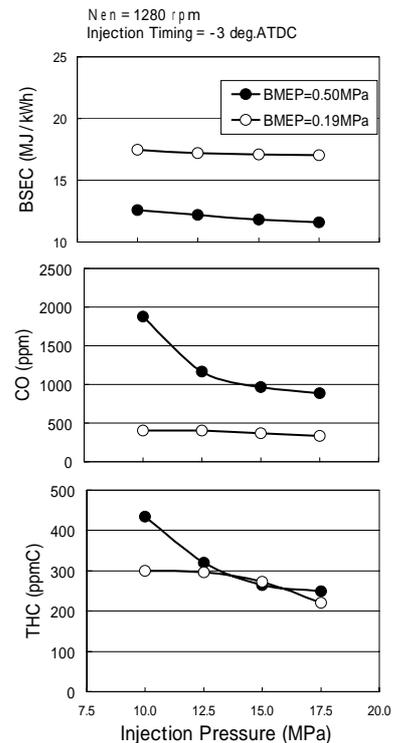


Fig.3 Effects of Injection Pressure

CO及びTHCが大幅に減少する。また、エネルギー消費率も改善されることから、噴射量の多い運転

条件では噴射圧力を増加し噴射期間を短縮するとともにDMEと空気との混合を強化することが必要と考える。しかし、噴射圧力の増加はインジェクターのノズルシート部からの燃料漏れ量に影響を与えることを考慮し、今回は噴射圧力を15MPa一定として実験を行った。

4.1.3. スワール比の影響

Fig. 4 に6噴孔インジェクターを用いエンジン回転速度1280rpm、噴射時期-3deg.ATDC一定の運転条件において、スワール比がエネルギー消費率及び排出ガスに及ぼす影響を調べた結果を示す。この結果から、スワール比が高いほど、COとTHC濃度が減少する傾向が認められた。また、エネルギー消費率がわずかに向上したことから、DMEエンジンではスワール流速を増加させDMEと空気との混合を促進させることが有効と考える。

4.1.4. 過給の影響

Fig. 5 に、エンジン回転速度1280rpm、高負荷及び中負荷運転条件において過給がエネルギー消費率と排出ガス(排出量 g/h)及び排出ガス温度に及ぼす

影響を調べた結果を示す。

中負荷では過給の影響は少ないが、噴射量の多い高負荷で過給を行うとエネルギー消費率が向上しCOが大幅に低減できる。これは、過給を行うと燃焼室内の空気密度が増加しDME噴霧内への空気導入が活発化して燃焼が改善されるためと考えられる。また、過給により排出ガス温度が低下するが、高負荷条件ではNOxが増加する。

4.2. 燃焼基本特性

DME燃焼の基本特性を調べるため、6噴孔インジェクターを用い噴射圧力を15MPa、エンジン回転速度1920rpm、無過給条件でDME運転を行い、ディーゼルエンジンの場合と比較した。

Fig. 6 に噴射時期が-11、-8及び-5 deg.ATDCにおけるシリンダー内の燃焼圧力及び熱発生率の経過を示す。DMEエンジンの燃焼は、燃焼室内に噴射されたDME噴霧が微粒化、蒸発、混合過程を経て着火に至るため、ディーゼルエンジンの場合と同様、予混合燃焼と拡散燃焼とからなる。しかし、デ

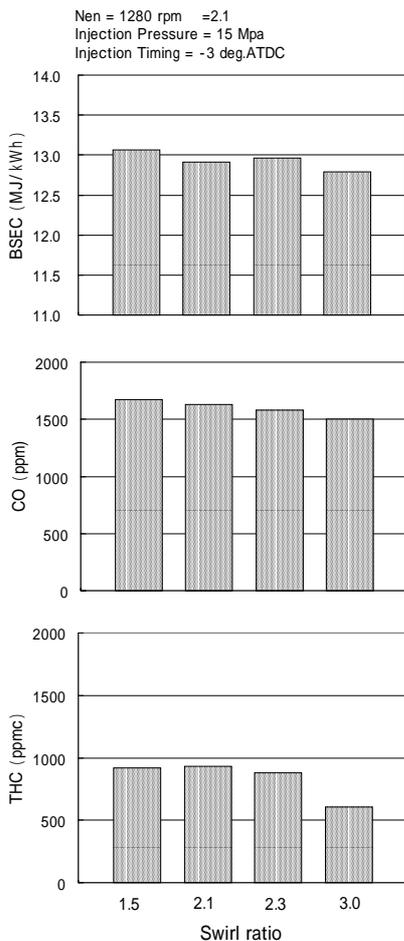


Fig.4 Effects of Swirl Ratio

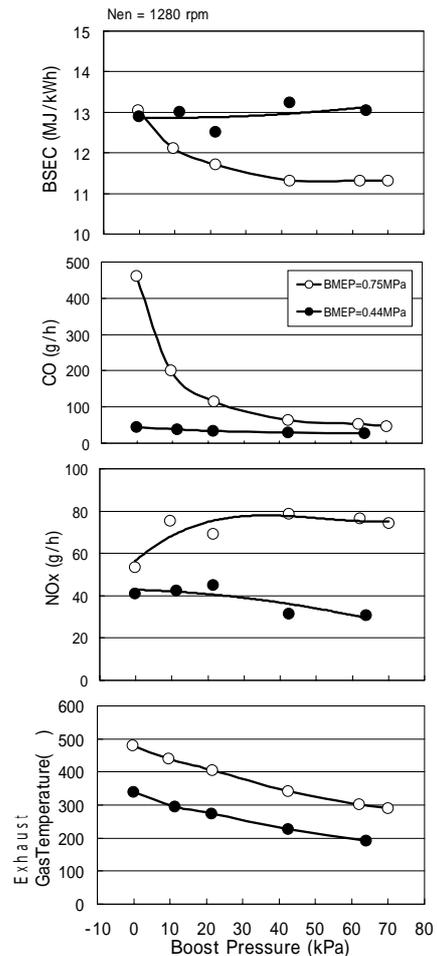


Fig.5 Effects of Supercharging

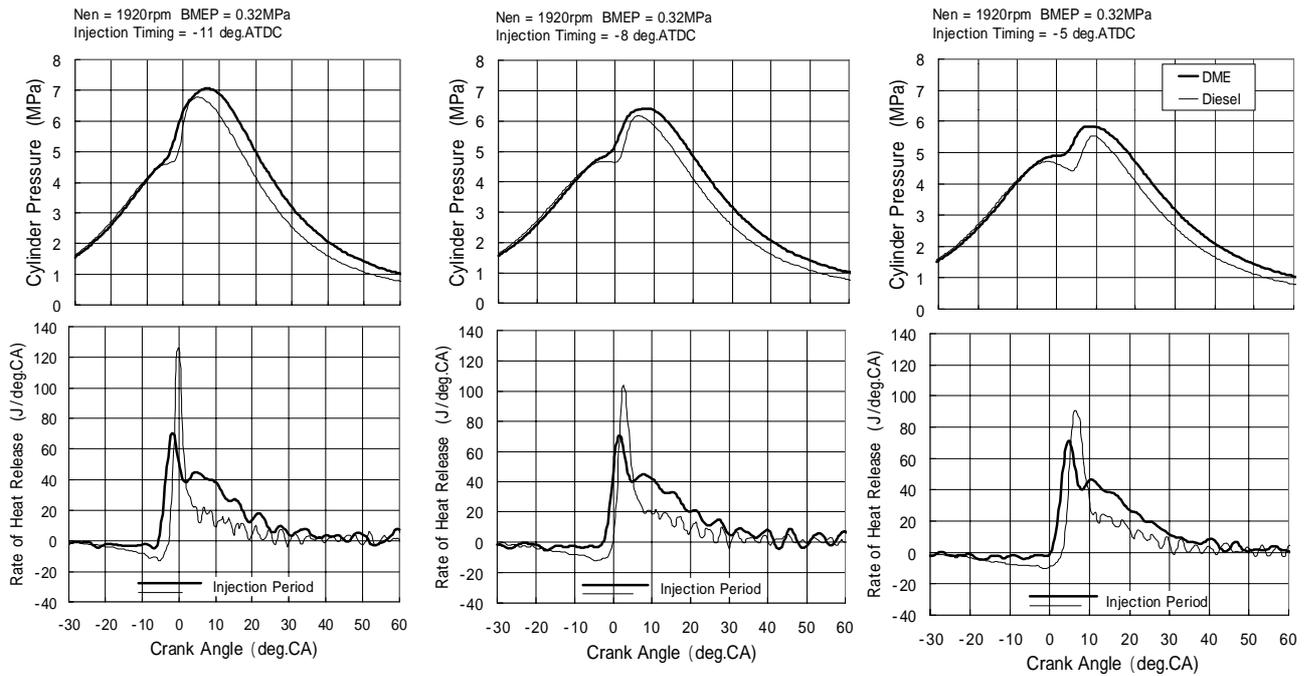


Fig.6 Comparison of Combustion Process

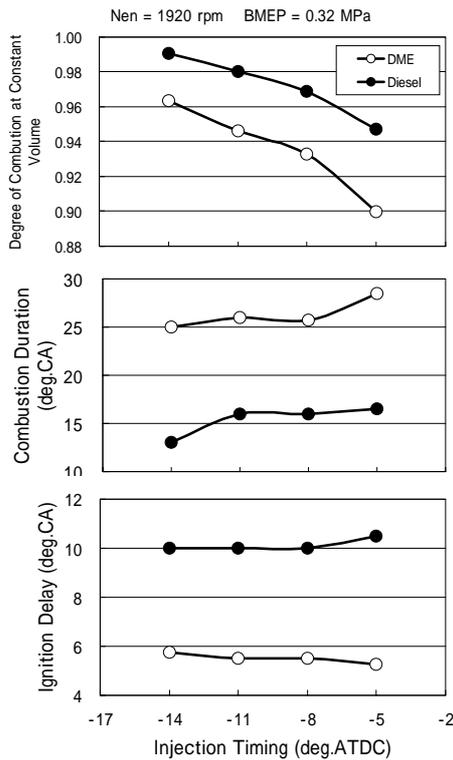


Fig.7 Combustion Characteristic

ディーゼルエンジンの場合と比べて予混合燃焼の最大値が低く拡散燃焼の割合が大きい。また、噴射時期

を変更した場合でも燃焼形態の変化が少ないことが特徴である。これは、Fig. 7 に示すようにDMEは自己着火しやすい燃料であるため、着火遅れ期間が軽油のほぼ半分と短くなることによる。しかしながら噴射期間がディーゼルエンジンの場合より長いため全体の燃焼期間はディーゼルエンジンの約 1.6 倍となり等容度が低下している。

この結果は、現状ではDMEの噴射特性(噴射率、噴射期間等)とそれに対応した空気流動や燃焼室形状等がDME用に適正化されていないためである。コモンレール式燃料噴射によるDME運転では噴射期間の増加を抑えるとともに拡散燃焼を活性化させ燃焼期間を短縮させる必要がある。

4.3. EGRの影響

エンジン回転速度 1280rpm, 中負荷及び高負荷運転条件において過給を行い、EGRを組み合わせた場合のエネルギー消費率と排出ガスの変化を Fig. 8 に示す。

EGR率を 40%近くまで増加させた場合、NOx は約 1/8 まで減少した。大量EGRにもかかわらず黒煙の排出は認められなかった。Fig. 9 にこの時のシリンダー内の燃焼圧力及び熱発生率の経過を示す。EGRを行うことにより着火遅れ期間がやや長くな

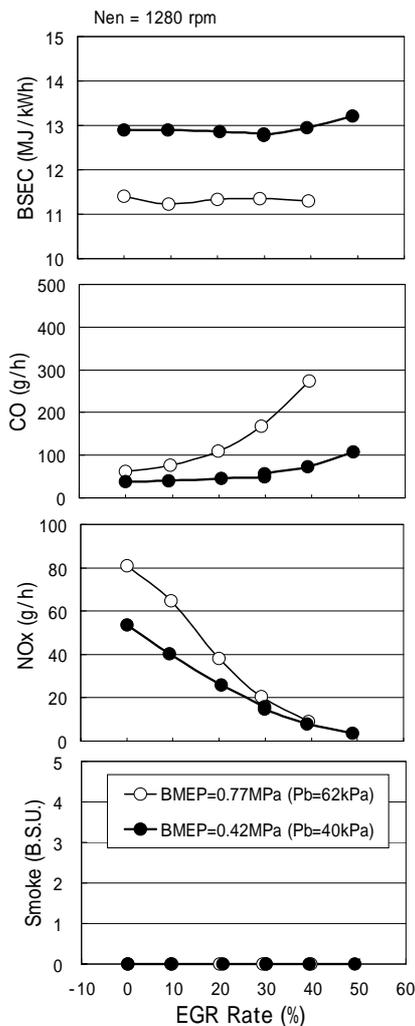


Fig.8 Effects of EGR

り予混合燃焼における熱発生率最大値が増加する。拡散燃焼への悪影響もみとめられない。

以上より、DME 運転では大量 EGR を行っても燃焼が損なわれず NO_x の大幅低減が行えるため、EGR は DME エンジンの有効な NO_x 対策になり得ることがわかった。ただし、EGR 率が 30% 近くになると CO が増加し始めるため、空気流動を強化させる等なお一層の燃焼改善を図る必要がある。

4.4. エンジン性能と排出ガス特性の比較

Fig. 10 にエンジン回転速度 1280rpm において過給を行い EGR を組み合わせた DME エンジンのエネルギー消費率及び排出ガス(排出量 g/kWh)の部分負荷特性を調べ、直接噴射式ディーゼルエンジンの場合と比較した結果を示す。

DME エンジンでは黒煙が排出されないため負荷全域で大量 EGR が可能となり、NO_x は全体的にディーゼルエンジンの 1/3 程度まで低減できる。現

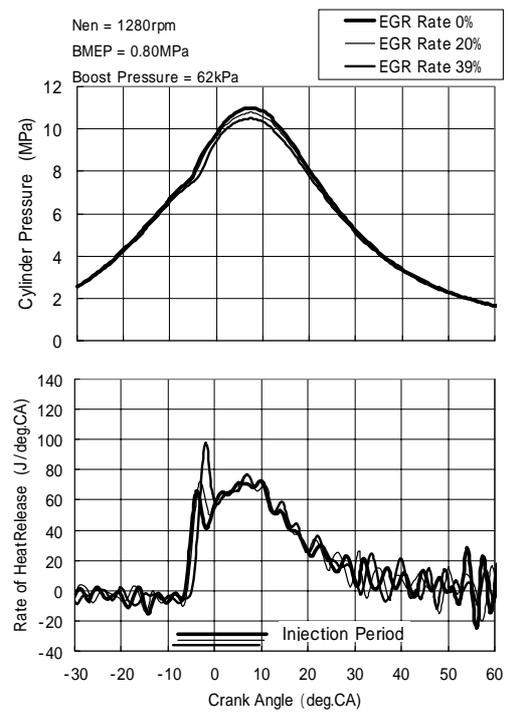


Fig.9 Combustion Process during EGR

状ではディーゼルエンジンと比べてエネルギー消費率が劣り、CO 及び THC の排出量が多い。今後、噴射特性と燃焼系の改善によりそれらの低減を図る必要がある。

4.5. CO₂ 排出量の比較

Fig. 11 に、DME 運転時の CO₂ 排出量をディーゼルエンジンの場合と比較した結果を示す。燃料の C/H 比の違いにより DME では燃焼時の CO₂ 生成量が軽油より 10% 程度少ない。そのため、DME 運転における CO₂ 排出量は、低負荷ではディーゼルエンジンと同等、高負荷ではディーゼルエンジンを下回る結果となった。

5. まとめ

単気筒直接噴射式ディーゼルエンジンをベースにコモンレール式燃料噴射により DME 運転を行い、エンジン性能と排出ガスの基本特性を調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 多噴孔インジェクターの適用、噴射圧力の増加及び高スワール比化、過給により燃焼促進及び CO、THC 低減の効果が得られた。

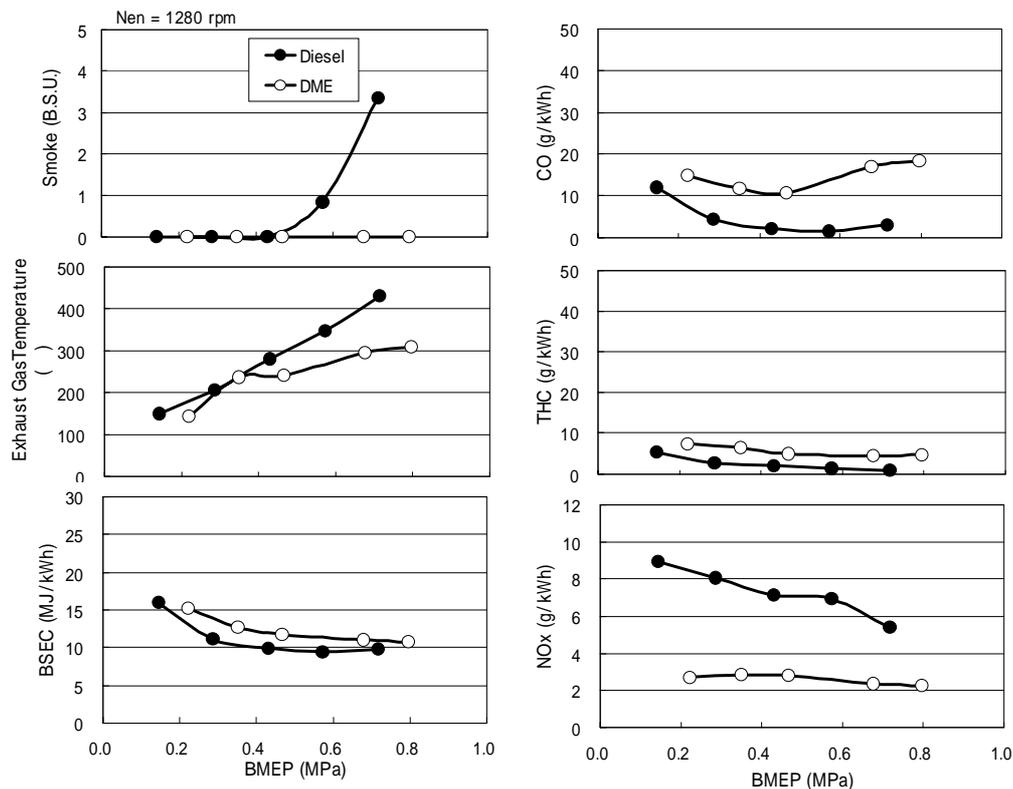


Fig.10 Comparison of Part Load Performance

(2) DMEエンジンでは大量EGRを行っても黒煙が排出されず燃焼も損なわれない。これによりNOxを1/3程度まで低減でき、CO₂排出量はディーゼルエンジンと比べて同等以下となり、環境負荷の低減が期待できる。

(3) 低・中負荷運転域のエネルギー消費率はディーゼルエンジンより劣り、大量EGR時にはCO排出量が増加しやすい。今後、DME燃料の特性をふまえた噴射特性や燃焼系の適正化によりそれらを改善する必要がある。

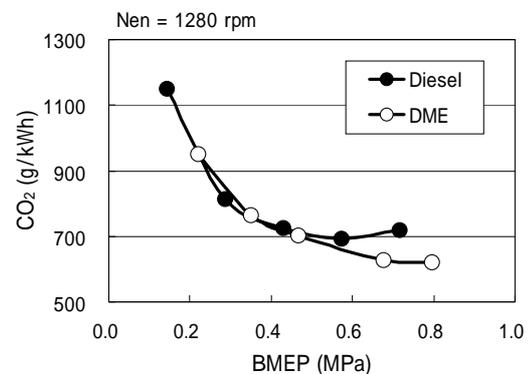


Fig.11 Comparison of CO₂ Emissions

参考文献

- 1) Paul Kapus, Herwig Ofner : Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether, SAE paper 950062.
- 2) 生澤勝美 他4名 : 小型トラック用DME直噴ディーゼルエンジンの燃焼特性, 自技会前刷集, 9838921(1998).