

## 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3報)

- 噴射圧力の高圧化による性能向上 -

環境研究領域  
早稲田大学

安 秉一      佐藤 由雄      高柳 智光  
大聖 泰弘

## 1. まえがき

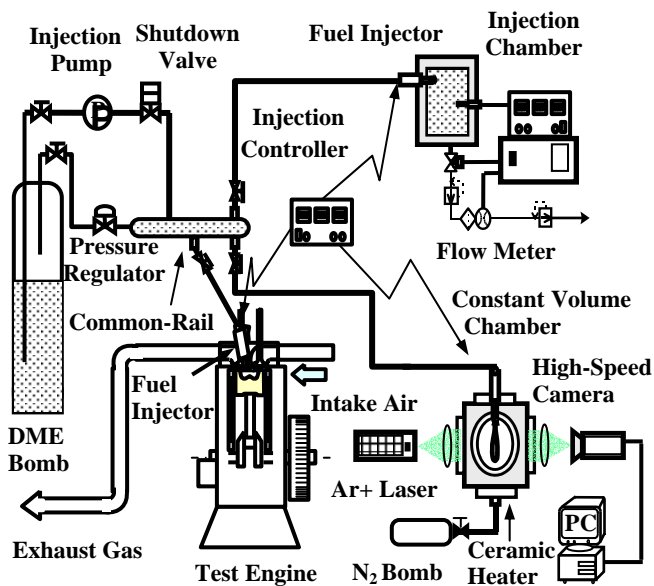
大都市地域の環境改善が緊急の課題となっており、大気汚染の主な原因であるディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物（ $\text{NO}_x$ ）および微粒子（PM）の同時低減が強く求められている。DME は天然ガスや石炭からの大量生産が可能であり、黒煙が排出しないことに加え、セタン価が高く、ディーゼルエンジンと同等の熱効率が期待できることから、ディーゼルエンジン用のクリーン燃料として注目されている。<sup>(1)</sup>しかし、DME は軽油に比べて蒸発しやすく着火遅れが短く、発熱量が低い特性を有するため、そうした燃料特性に適した噴射系及び燃焼系の開発が必要であり、特に高速高負荷時における燃焼改善が必要とされている。

そこで、本研究ではエンジン性能と排出ガスに及ぼす噴射圧力の影響を明らかにするため、実機用のインジェクターを用いてエンジン試験を行うとともに、高温高圧場に噴射される DME 噴霧の分散、蒸発過程を高速度撮影し、DME エンジンの性能及び燃焼特性との関係を調べたので報告する。

## 2. 実験装置及び方法

## 2.1. コモンレール式燃料噴射装置

図 1 に実験装置の概略を示す。噴射系にはコモンレール式燃料噴射装置を使用した。図の左上部に示すように、DME はモータ駆動の燃料噴射ポンプにより加圧されコモンレール部において圧力調整された後、インジェクターにより噴射される。表 1 に実験に使用したエンジンおよび噴射系の諸元を示す。このインジェクター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する方式である。DME エンジンではディーゼル



**図 1 実験装置の概略図**

と同等の出力を得るために約 1.8 倍の噴射量が必要となる。DME の燃料特性を考慮して噴射期間を増やさ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より拡大した。

## 2.2. 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 1053cm<sup>3</sup>の単気筒直噴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り付けた。燃料として工業用の DME (純度 99.9wt%) を使用し、燃料噴射ポンプ及びノズル部における潤滑を目的として、添加剤 (Lubrizol) を 800ppm の割合で混合した。実験では DME タンクを温水で暖めてそのフィード圧力を約 1.0MPa に設定した。運転に当たっては、トルク一定でエンジン回転速度を 1280rpm、1920rpm、2560rpm、2800rpm とした。また、噴射時期は各エンジン回転数において、燃費が最良になる噴射タイミングを設定

表 1 エンジンの諸元

	DME engine	Diesel engine
Type	4-stroke	←
Combustion	Direct injection	←
Number of cylinder	1	←
Bore & Stroke、 mm	108 × 115	←
Displacement、 cm <sup>3</sup>	1053	←
Compression ratio	18.1	←
Injector、 mm	Common rail	Common rail
	0.5 × 5	0.20 × 5
Injection pressure、 MPa	20 - 35	60 - 110

表 2 可視化実験条件

Injection pressure、 MPa	20、 25、 30、 35
Nozzle diameter、 mm	0.5
Number of hole	5
Injection quantity、 mm <sup>3</sup>	110
Ambient density、 kg/m <sup>3</sup>	16
Ambient temperature、 K	300、 500、 700

定した。排出ガスについては、CO を NDIR、NO<sub>x</sub> については CLD、THC は HFID の各方式で測定した。

### 2.3. 噴射特性実験

図 1 の右下部には DME 噴霧の可視化装置を示す。可視化装置は定容容器、燃料供給系、光学系、高速度カメラおよび画像処理装置により構成される。定容容器の両面には直径(120mm) × 厚さ(50mm)の石英ガラスを装着し、インジェクターからの噴霧を観察できるようにした。観測部は非燃焼状態とするため、窒素雰囲気とし、容器内の圧力は高压のボンベから供給した窒素を減圧レギュレータで調整した。また、高温用のセラミックヒータを取り付けて、温度制御装置により設定温度になるように調節した。

さらに、高速度カメラ ( PhantomV7.0, Vision Research ) を用い、10000fps ( 画像度 512 × 386 ) の撮影速度で非燃焼噴霧のシュリーレン及び散乱光撮影を行った。撮影した画像は、画像解析ソフト ( DITECT 社 ) に入力し、噴霧特性解析を行った。その撮影条件を表 2 に示す。可視化実験に使用したインジェクター、噴射圧力は単気筒エンジンと同条件で行った。また、噴射率測定は図 1 の右上部に示す Zeuch の測定原理を応用した DME 用の噴射率計 ( 小野測器製 ) を用い、噴射率計の下流に設置した DME

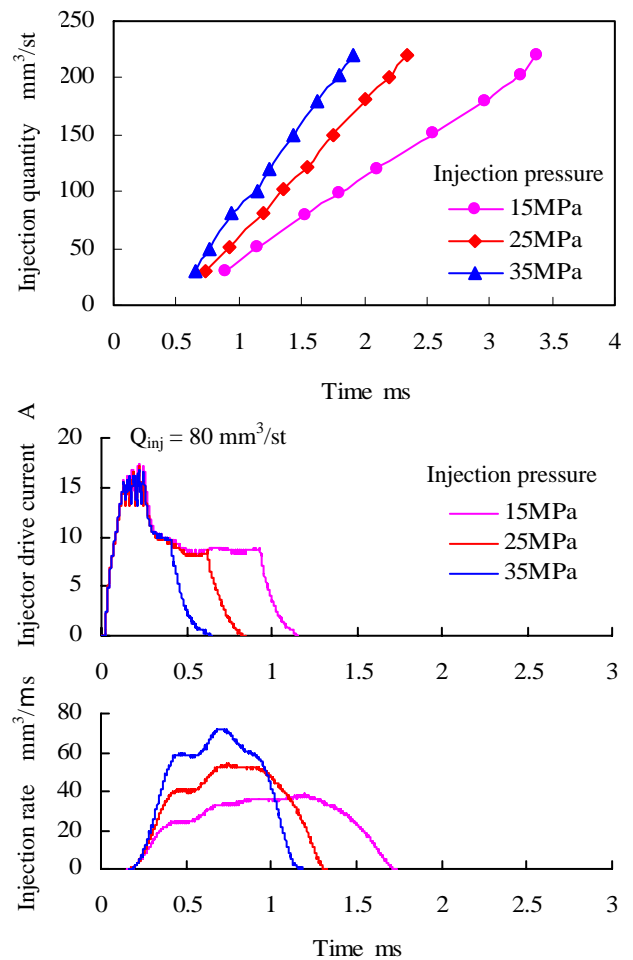


図 2 DME 噴射特性

流量計 ( 小野測器製 ) により実際の流量基準で噴射率の値を補正する方法を採用した。<sup>(2)</sup> この際、エンジンシリンダー内圧力に等しい 4 MPa の背圧を設定した。図 2 には噴射量及び噴射率測定結果を示す。図から噴射圧力が高くなるほど噴射期間が短くなり、噴射率のピークは高くなる傾向が認められた。本実験の測定範囲において、噴射量はほぼ直線性を示した。

### 3. 実験結果および考察

コモンレール式噴射装置を用いた単気筒エンジンにおいて、エネルギー消費率に対する噴射圧力の影響を調べた結果を図 3 に示す。噴射圧力の上昇に伴い、エンジン回転速度によらずエネルギー消費率が減少する。特に、高回転、高負荷においてエネルギー消費率の改善が顕著になる傾向がある。また、同エンジンにディーゼルコモンレール噴射装置を用いて、軽油運転を行った実験結果と比較すると、

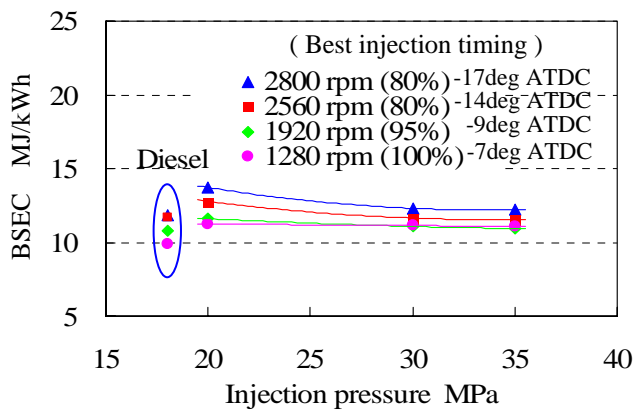


図3 エネルギー消費率に対する噴射圧力の影響

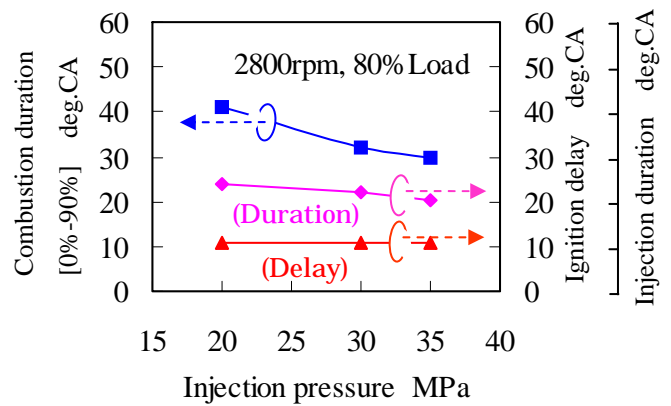


図5 燃焼特性値に及ぼす噴射圧力の影響

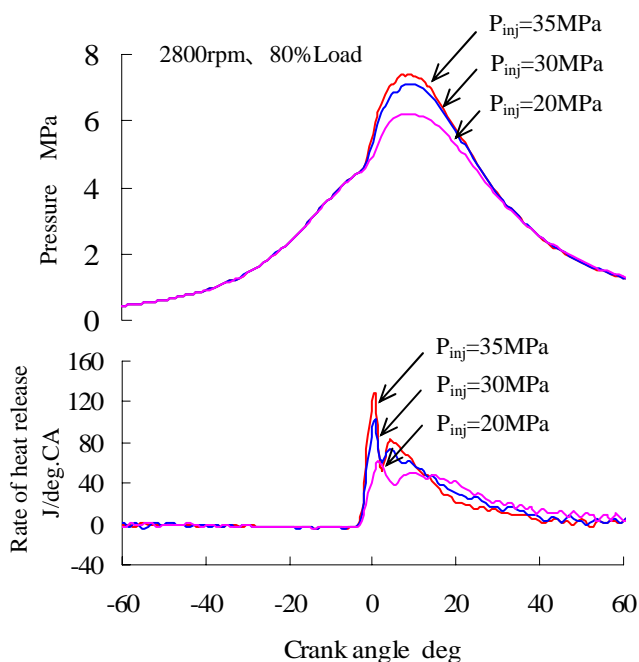


図4 各噴射圧力における燃焼解析結果

DME 運転時には高回転・高負荷において噴射圧力が高いほど、エネルギー消費率が軽油運転時に近づく結果が得られた。図4は各噴射圧力における燃焼解析結果を示す。噴射圧力を高くするとシリンダー内の最高圧力が増加し、予混合燃焼における熱発生率が増加する。これは燃料噴霧の微粒化による蒸発と空気導入が促進され、活発な燃焼が行われたことを示す。図5には燃焼特性値に及ぼす噴射圧力の影響を示す。図から噴射圧力の上昇に伴い、着火遅れ期間の変化は少ないが、燃焼期間が大幅に短縮され、また、噴射期間も短くなる傾向を示した。この結果から、噴射圧力の上昇による混合気形成の促進と噴

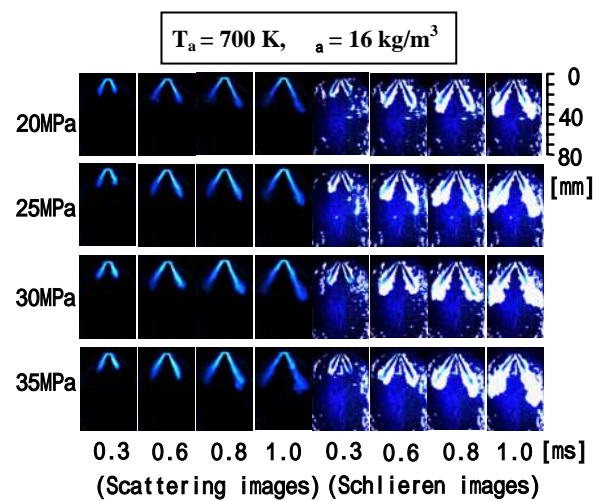


図6 噴射圧力の変化に対する散乱およびシュリーレン画像

射期間短縮化の両方効果により燃焼が改善されることになる。次に、単気筒エンジンの圧縮時の温度、圧力を模擬して、燃焼に至るまでのDME噴霧の微粒化、蒸発過程を調べた。ここでは、5噴孔の内2噴孔の噴霧のみを可視化した。図6は雰囲気温度700K、雰囲気密度16kg/m<sup>3</sup>の場合、噴射圧力の変化に対する散乱およびシュリーレン画像を示す。散乱光の撮影結果から噴射圧力の上昇に伴い、液滴の到達距離が長くなる傾向が認められた。実機の圧縮時に近い雰囲気条件 ( $P_a=3.23\text{MPa}$ ,  $T_a=700\text{K}$ ) においても、微粒化された液滴が周囲の熱を受けて蒸発しながらも、噴霧先端まで液滴が到達することで軽油噴霧と同様の挙動を示した。また、シュリーレン撮影の結果から、散乱撮影結果と同様に、噴射圧力が高

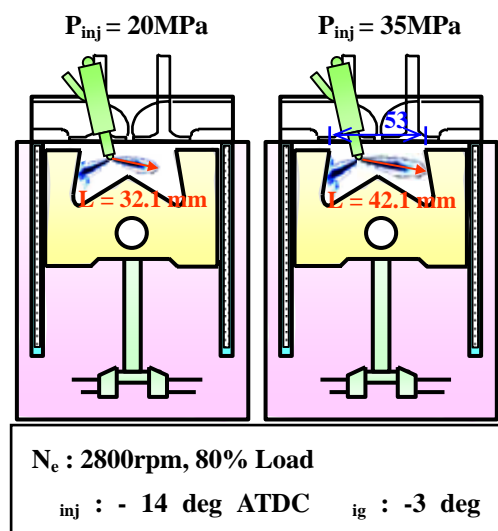


図7 着火時における燃焼室と噴霧の関係(模擬図)

くなるほど、液滴と蒸気を含んだ噴霧の到達距離が長くなり、液滴の蒸発が促進されることで噴霧の外周部において乱れが大きい蒸気部が広がる傾向が見られた。本実験の最も噴射圧力が高い35MPaの場合において、噴霧同士の干渉もなく液滴の微粒化及び蒸発が活発になることを確認した。図7は着火時における燃焼室と噴霧の位置関係の模擬図を示す。DME 噴霧は着火時 (-3degATDC)において、分散しながらもキャビティーの中に納まる傾向を示した。

図8にはDMEエンジンとベースディーゼルエンジンの全負荷性能を比較した結果を示す。DMEエンジン実験は排気温度上限を700℃として行った結果である。噴射圧力が高くなるほどエンジン出力は増加し、低回転時ではディーゼルの場合、スモークリミットにより低くなっており、DMEの場合は煙が発生しないことから十分トルクアップが可能である。また、高回転の噴射圧力35MPaの場合は、エネルギー消費率はやや高くなるものの、ベースディーゼルと同等の出力を得ることができた。今後、更なる高圧噴射により、性能向上が可能であると思われるが、同時に噴射圧力に適した燃焼室形状の最適化が必要である。

#### 4. まとめ

コモンレール式噴射装置を用いて単気筒DME圧縮着火エンジンの実験を行うとともに、散乱光とシュリーレン法により、高温高圧場でのDME噴霧の分散、蒸発過程を高速度撮影し、噴射圧力とエンジン性能

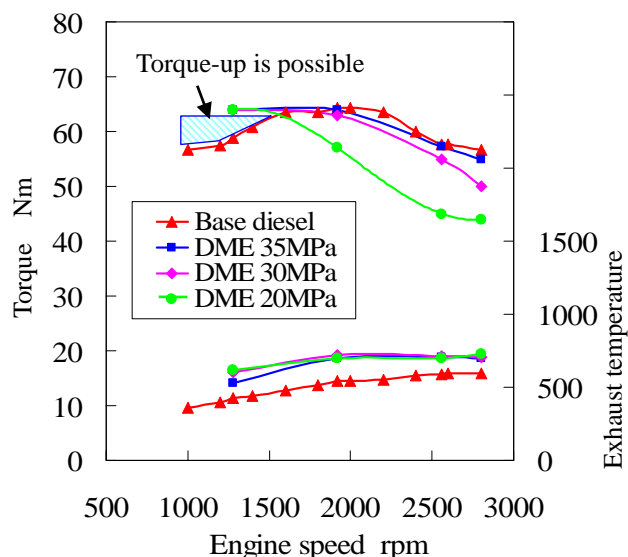


図8 DMEエンジンとベースディーゼルエンジンとの全負荷性能比較

および燃焼特性との関係を調べた結果、次のような知見を得た。

- (1) 噴射圧力35MPaの場合、エネルギー消費率はやや高いものの、ディーゼルと同等の出力を得る。
- (2) 噴射圧力が高くなるほど、予混合燃焼が活発になり燃焼期間が短縮する。NOx排出量は増加するが、高速高負荷域においてもエネルギー消費率は向上する。
- (3) 噴霧の撮影結果から噴射圧力35MPaまでは、噴霧同士の干渉もなく液滴の微粒化および蒸発が活発になる。
- (4) DME噴霧は圧縮上死点近傍相当の高温高圧場において、微粒化された液滴が周囲の熱を受けて蒸発しながらも、噴霧先端まで液滴が到達し、軽油噴霧と同様の挙動を示す。

最後に、本実験に協力を頂いた交通研の小林啓樹氏に心から感謝の意を表す次第である。

#### 参考文献

- (1) 若井謙介、他3名、代替ディーゼル燃料としてのDimethyl Ether(DME)の噴霧特性に関する研究、自動車技術会講演前刷集、No.976-17(1997)
- (2) Tadashi IKEDA et al., Measurement of Rate of Multiple Fuel Injection with Diesel Fuel and DME, JSAE Paper 2001-01-0527