環境対応型ディーゼルエンジンの燃焼研究*
(第1報, 圧縮比・燃料噴射圧の影響)

松平伸康^{*1}, 沼田明^{*1}
長船信之介^{*2}, 井元浩二^{*2}

Increase of Thermal Efficiency and Reduction of NO_x Emissions
in a DI Diesel Engine
(1st Report, Influence of Compression Ratio and Fuel Injection Pressure)

Nobuyasu MATSUDAIRA, Akira NUMATA,
Shinnosuke OSAFUNE and Koji IMOTO^{*3}

^{*3} General Machinery & Special Vehicle Headquarters Mitsubishi Heavy Industries, LTD.,
3000 Tana, Sagami-hara-shi, Kanagawa, 229-1193 Japan

In order to increase the brake thermal efficiency and reduce NO_x emissions of a stationary diesel engine, a direct injection (DI) combustion system, which consists of a combustion chamber with a high compression ratio and a fuel injection system with a high injection pressure, was installed in a single cylinder diesel engine with a 240 mm bore, and it was tested to investigate its potential and fundamental characteristics. The high compression ratio was proven to have a potential of high brake thermal efficiency and become advantageous on the point of the brake thermal efficiency and NO_x emissions at the retard of fuel injection timing. The high injection pressure by means of small nozzle hole diameter restrained the initial combustion, promoted the diffused combustion and increased the effective combustion efficiency. The high compression ratio and high injection pressure with the retard of fuel injection timing improved the brake thermal efficiency and NO_x emissions.

Key Words: DI Diesel Engine, Thermal Efficiency, NO_x Emissions, Combustion, Compression Ratio, Combustion Chamber, Fuel Injection Pressure, Heat Release Rate

1. 緒 言

現在, 二酸化炭素による地球温暖化, 窒素酸化物による酸性雨などの環境問題が深刻化しており, 燃料の燃焼により発生する有害排出物質の低減の要求が一段と強まっている。石油コージェネレーションシステム, 発電機用の定置式ディーゼルエンジンの分野でも例外ではなく, 早急な対応を迫られている。

定置式ディーゼルエンジンの大半を占めている直噴式ディーゼルエンジンは, 熱効率の点で優れており, 二酸化炭素 CO₂ 排出低減の点で有利であるが, 窒素酸化物 NO_x, 吐煙などの低公害性の点で課題が残されている。そこで, 本研究では, 直噴式ディーゼルエンジンの熱効率をさらに向上するとともに, 低 NO_x 化を実現するために, まず, 高圧縮比化, 高圧噴射の燃焼システムを追求するとともに, その基本特性解明を行った。

本論文は, 上記燃焼システムを単筒エンジンに適用したときの性能, 燃焼試験結果について述べたもので

ある。

2. 本研究の技術的ねらい

ディーゼルエンジンの正味熱効率 η_e は, 以下の式で表される⁽¹⁾。

$$\eta_e = \eta_{th} \times \eta_{gl} \times \eta_{comb} \times (1 - \eta_{cool}) \times \eta_m \dots\dots\dots (1)$$

ただし,

η_{th} : 理論熱効率 [$=f(\epsilon, K)$: 圧縮比 ϵ , 比熱比 K の関数]

η_{gl} : 等容度

η_{comb} : 燃焼効率

η_{cool} : 熱損失率

η_m : 機械効率

直噴式ディーゼルエンジンの熱効率向上のために, 本研究では, 上記正味熱効率の支配因子, すなわち, 理論熱効率, 等容度, 燃焼効率, 熱損失, 機械効率の改善を図る。

図1に示すように, 理論熱効率向上のためには, 高圧縮比化が, 等容度向上のためには, 燃焼期間短縮, 着火時期制御が, 燃焼効率向上のためには, 空気過剰率向上, 燃料と空気の混合気形成エネルギー向上が, 熱損失低減のためには, 吸気スワール速度抑制によるガスの熱伝達率低減が, 機械効率向上のためには, 摩

* 原稿受付 2000年8月10日。

^{*1} 三菱重工業(株)汎用機・特車事業本部(〒229-1193 相模原市田名3000)。

^{*2} 正員, 三菱重工業(株)汎用機・特車事業本部。

E-mail: Koji_Imoto@mail.smnw.mhi.co.jp

擦損失低減が重要である。

このために、本研究では、高圧縮比化、筒内最大圧力の上昇、噴射期間短縮・噴射時期制御、高圧噴射による燃料噴射エネルギー増大、高圧力比 VG(可変容量)過給機の適用、低スワール比化、燃焼室内デッドボリューム低減、冷却システムおよびピストリングの改良を図る。

低 NO_x 化のためには、エンジンモディフィケーションによる燃焼制御、すなわち火炎温度低減、酸素濃度制御が重要である。本研究では、火炎温度低減に着目し、定圧燃焼サイクル実現のための初期燃焼抑制、拡散燃焼促進を図るとともに、給気冷却、新水噴射システム(単一ノズルから燃料、水を交互に噴射するシステム)⁽²⁾を適用する。

そこで、まず本論文では、直噴式燃焼システムの基本仕様である圧縮比、燃料噴射圧、燃料噴射時期が性能、排ガス、燃焼特性に及ぼす影響について検討した。

3. 試験結果および考察

供試エンジンとして、水冷四サイクル直噴単筒ディーゼルエンジン(ボア:φ240 mm)を用いた。その主要諸元を表1に示す。燃料噴射ポンプはユニットポンプ、燃料噴射弁はホールノズル、燃料は JIS 2 号軽油を用いた。

以下に、直噴式燃焼システムにおける主要な燃焼試験結果を述べる。

3.1 圧縮比の影響 機関回転数 $N_e=1\,000\text{ rpm}$ 、全負荷(正味平均有効圧力 $P_{me}=2.1\text{ MPa}$ 相当)において、圧縮比が理論熱効率および機械効率に及ぼす影響の計算結果を図2に示す。ここで、理論熱効率 η_{th} は、以下のオットーサイクルの理論熱効率の式から求めたものである[式(1)の正味熱効率 η_e は、オットーサイクルベースであるため]。

$$\eta_{th}=1-1/\varepsilon^{K-1} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

Fig.1 Concept for high thermal efficiency and low NO_x emissions

Table 1 Engine specifications

Engine	4Cycle Water Cooled
Combustion System	Direct Injection
Number of Cylinders	1
Bore	$\phi 240\text{mm}$
Number of Valves	4
Fuel	Gas Oil / MDO
Compression Ratio	(14.2)
Fuel Injection Pump	Unit Pump Plunger Dia. $\phi 26\text{mm}$
Fuel Injection Nozzle	Hole Nozzle Number of Holes 10 Hole Diameter (0.48mm) Spray Angle 160° Opening Press. 40 MPa

Fig. 2 Effect of compression ratio on theoretical thermal eff. and mechanical eff

ϵ : 圧縮比

K : 比熱比 (=1.4 にて計算)

また、摩擦損失平均有効圧力 P_{mf} は、リカルドの式⁽³⁾を用いて算出した。

圧縮比を増大するにつれて、理論熱効率は高くなるが、摩擦損失は増大し、機械効率 $\eta_m [= P_{me}/(P_{me} + P_{mf})]$ は低下する。しかし、理論熱効率 η_{th} と機械効率 η_m の積は大きくなり、高圧縮比化は正味熱効率向上のポテンシャルを有することがわかる。

圧縮比および燃料噴射時期が性能、排ガス特性に及ぼす影響を図3に示す。ここで、正味熱効率、 NO_x に

Fig. 3 Effect of compression ratio on engine performance and exhaust emissions

ついては、圧縮比 $\epsilon=14.2$ 、燃料噴射時期 $\theta_{inj}= \text{BTDC } 15^\circ$ の場合を基準にして、相对比较している。燃料噴射時期を遅延するにつれて、 NO_x 筒内最大圧力は低減するが、正味熱効率は低下し、吐煙はわずかに増大する傾向にある。しかし、圧縮比 $\epsilon=16.0$ は、 14.2 の場合に比べて、 NO_x 、筒内最大圧力の低減割合は大きく、正味熱効率の低下割合は小さい。この理由を以下で考察する。燃料噴射時期を遅延すると、燃焼遅れ、燃焼悪化により、前に述べたように正味熱効率は低下するが、ピストン下降速度、したがってシリンダ内の体積増加率も大きくなり、シリンダ内のガス圧力、温度は低下する。圧縮比が高い場合は、圧縮比が低い場合に比べて、膨張比も大きくなり、したがって、膨張行程のクランク角当たりのシリンダ内の体積変化率(膨張率)の増加によりピストン仕事が増大するとともに、ガス圧力、温度の低下率が大きくなる。したがって、高圧縮比のもとで燃料噴射時期を遅延した場合は、低圧縮比の場合に比べて、正味熱効率の低下割合は小さく、ガス温度低下に伴う NO_x 、圧力低下に伴う筒内最大圧力の低減割合は大きくなると思われる。図

Fig. 4 Effect of compression ratio on engine performance and exhaust emissions

4に圧縮比を横軸にとった場合の燃焼試験結果を示す。燃料噴射時期 θ_{inj} = BTDC 15° 一定のもとで、圧縮比を増大すると、正味熱効率は向上する傾向にあるが、 NO_x 、筒内最大圧力は増大し、吐煙は一定のままである。したがって、高圧縮比化と燃料噴射時期遅延の組合せが考えられる。例えば、圧縮比 ϵ = 16.0のもとで燃料噴射時期 θ_{inj} を 2° 遅延 (θ_{inj} = BTDC 15° から BTDC 13°) した場合は、圧縮比 ϵ = 14.2, 燃料噴射時期 θ_{inj} = BTDC 15° の場合に比べて、 NO_x 、正味熱効率の点で有利であることがわかる。

以上より、高圧縮比と燃料噴射時期遅延の組合せは、高热効率、低 NO_x 上、有効な手段であることを確認できた。

3.2 ノズル噴孔径の影響 燃料噴射系単体試験装置を用いて、ノズル噴孔径が燃料噴射特性に及ぼす影響を調査した。試験結果を図5、6に示す。カム軸回転数 N_c = 500 rpm (機関回転数 N_e = 1000 rpm 対応)、燃料噴射量 q_f = 2100 mm³/st (全負荷相当)、ノズル噴孔数 10 孔のもとで、ノズル噴孔径 d = 0.48 mm から 0.45, 0.42 mm に縮小していくと、最大噴射圧 (ノズル側) P_f = 151 MPa から 157, 168 MPa に増大するが、噴射期間 θ_f (カム角度) = 11.2 $^\circ$ から 12.0, 13.0 $^\circ$ と長くなる。

ノズル噴孔径が性能、排ガス特性に及ぼす影響を図7に示す。ここで、正味熱効率、 NO_x については、ノズル噴孔径 d = 0.48 mm, 燃料噴射時期 θ_{inj} =

Fig. 5 Effect of nozzle hole diameter on fuel injection characteristics

Fig. 6 Effect of nozzle hole diameter on fuel injection characteristics

BTDC 15° の場合を基準にして、相対比較している。燃料噴射時期 θ_{inj} = BTDC 15° のもとで、ノズル噴孔径を縮小すると (噴射圧、噴射期間ともに増大)、筒内最大圧力は低減するが、 NO_x は増大する傾向にあり、正味熱効率、吐煙は、ほぼ一定である。これに対して、燃料噴射時期 θ_{inj} = BTDC 10° のもとで、ノズル噴孔径を縮小すると、 NO_x は増大するが、正味熱効率は向上し、吐煙、筒内最大圧力は低減する傾向にある。以上より、ノズル噴孔径縮小、すなわち高圧噴射 (ただし、噴射期間は増大する) は、燃料噴射時期を遅延したほうが改善効果は大きいことがわかった。この理由を

Fig. 7 Effect of nozzle hole diameter on engine performance and exhaust emissions

Fig. 8 Effect of nozzle hole diameter on combustion characteristics

以下で考察する。燃料噴射時期を遅延すると、燃焼遅れ、燃焼不良により、性能(正味熱効率、吐煙)が悪化する(図3)。ノズル噴孔径を縮小すると、図5、6に示すように噴射圧、特に後期の噴射圧が増大し、後期の燃料と空気の混合気形成、したがって、燃焼が促進される(図8参照)。このために、ノズル噴孔径縮小は、燃料噴射時期遅延時の性能上の改善効果が大きくなると思われる。燃料噴射時期遅延時におけるノズル噴孔径が燃焼特性に及ぼす影響を図8に示す。ノズル噴孔径を縮小するにつれて、初期燃焼は抑制され、後期の燃焼が活発化する傾向にある。これは、図5に示すように、初期噴射圧はほぼ同等であるので、ノズル噴孔径が小さいほうが初期噴射量、したがって初期噴射率が抑制され、後期の噴射圧上昇および噴射期間増大、すなわち後期の噴射率増大に基づくためと思われる。

筒内圧力の熱発生解析結果を図9に示す。まず、図9における有効受熱比について説明する。筒内圧力の熱発生解析から得られる総熱発生量には熱損失分をすでに含んでいるから、燃料の有する発熱量 $H_u m_f$ (H_u : 燃料の低位発熱量, m_f : 燃料質量) に対する総発熱量 Q_T の比を有効受熱比 $Q_T/(H_u m_f)$ (燃焼室内の

Fig. 9 Effect of nozzle hole diameter on combustion characteristics

ガスが実際に受け取った熱量割合)と定義すると、式(3)が成立する。

$$Q_T/(H_u m_f) = \eta_{\text{comb}} \times (1 - \eta_{\text{cool}}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、有効受熱比は図9に示すとおりとなる。ノズル噴孔径変化時は、圧縮比 $\varepsilon = 15.0$ 一定であるので、理論熱効率、機械効率は一定であり、式(1)から、正味熱効率は、等容度、有効受熱比 $\eta_{\text{comb}} \times (1 - \eta_{\text{cool}})$ に依存するため、これら熱効率支配因子を図9に記載している。ノズル噴孔径を縮小するにつれて、燃焼期間は長くなり、等容度は低下するが、有効受熱比が増大するために正味熱効率は向上する。

最大噴射圧と有効受熱比の関係を整理したものを図10に示すが、最大噴射圧を増大するにつれて、有効受熱比も増大する傾向にある。噴射期間と燃焼期間の関係を図11に示す。噴射期間が長くなるにつれて、燃焼期間は長くなり、燃焼期間は、噴射期間の約2倍であることがわかる。この理由を以下で考察する。ディーゼルエンジンの燃焼は、燃料噴射、燃料と空気の混合、着火、燃焼に基づく。したがって、燃料噴射後、燃料と空気の混合に時間を要するとともに、着火、燃焼は、温度、局所的空燃比が確保されて、はじめて生ずる現象であり、このためにも時間を必要とし、その結果、噴射期間に比べて燃焼期間は長くなる。本直噴式

Fig. 10 Effect of injection pressure on effective combustion efficiency

Fig. 11 Relation of injection period and combustion period

燃焼システム、すなわち本給気系、燃料噴射系、燃焼系の現状の組合せでは、燃焼期間は噴射期間の約2倍であるが、正味熱効率向上のためには、燃焼期間をさらに短縮する必要がある。

3・3 燃焼解析結果に対する考察 燃料消費率 b_e 、燃料の低位発熱量 H_u から算出した正味熱効率 η_{e1} と燃焼解析結果をもとに熱効率支配因子から式(1)を用いて算出した正味熱効率 η_{e2} を3ケースについて比較したものを表2に示す。本表において、理論熱効率 η_{th} は、式(2)から計算したものであり、機械効率 η_m 算出のための摩擦損失平均有効圧力 P_{mf} は、供試エンジンにおけるウィラン法による計測値を用いた。正味熱効率の比 $\eta_{e2}/\eta_{e1} = 1.015 \sim 1.023$ の範囲にあり、その差は平均2.0%であり、本燃焼解析結果の精度は、非常に良好であることを確認できた。

本燃焼システムにおける燃焼温度(サイクル最高ガス温度)と NO_x (残存 O_2 13%換算)の相関性を図12に示す。サイクル最高ガス温度が低下するにつれて、 NO_x 濃度は低減する傾向にある。これまで、 NO_x 濃度は局所的な火炎温度に依存し、火炎温度が高くなると、 NO_x 生成率が増大するといわれている。サイクル最高ガス温度は、各クランク角におけるシリンダ内の平均ガス温度の中の最高値であり、この温度が低下すれば、局所的な火炎温度が低下、あるいは局所的火炎温度の高い領域が減少することが推測され、このために NO_x 濃度は低減するものと思われる。

以上より、本燃焼システムにおいて、サイクル最高ガス温度は NO_x 濃度が高い(800 ppm以上)レベルでは NO_x 濃度の指標になり得ることを確認できたが、

Table 2 Comparison of brake thermal eff. η_{e1} and η_{e2}
(η_{e1} : calculated by BSFC
(η_{e2} : calculated by factors of
brake thermal eff

$\varepsilon = 15.0, N_e = 1000\text{rpm, Full Load}$			
Item	T. NO.	A	B
b_e	g/kWh	212.7	210.9
P_{me}	MPa	2.19	2.19
P_{mf}	MPa	0.24	←
η_{e1}	%	39.6	39.9
η_{th}		0.661	←
η_{e1}		0.748	0.737
$\eta_{\text{comb}} \times (1 - \eta_{\text{cool}})$		0.908	0.928
η_m		0.903	←
η_{e2}	%	40.5	40.8
η_{e2}/η_{e1}		1.023	1.023

Fig. 12 Relation of max. temperature of cycle and NO_x concentration

このような結果は、他の燃焼システムにおいても確認されている⁽⁴⁾。

4. 結 論

定置式ディーゼルエンジンの高熱効率化、低 NO_x 化のために、本研究では単筒エンジンを用いて、直噴式燃焼システムの追求とその基本特性解明を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 本燃焼システムにおいて、高圧縮比および高圧噴射と燃料噴射時期遅延との組合せは、高熱効率化、低 NO_x 化に有効な手段であることがわかった。

(2) 高圧縮比化により、理論熱効率と機械効率の積は大きくなり、正味熱効率向上のポテンシャルを有することを確認できた。また、高圧縮比化のもとで燃料噴射時期を遅延した場合は、正味熱効率の低下割合は小さく、 NO_x 、筒内最大圧力の低減割合は大きいことがわかった。

(3) ノズル噴孔径を縮小すると、最大噴射圧は増大し、噴射期間は長くなる。ノズル噴孔径縮小は、燃

焼噴射時期遅延時の性能上の改善効果が大きく、正味熱効率は向上し、吐煙、筒内最大圧力は低減する。また、初期燃焼抑制、後期燃焼が促進され、燃焼期間は長くなり等容度は低下するが、有効受熱比は増大する。

(4) 本燃焼システムにおいて、噴射期間は長くなるにつれて、燃焼期間も長くなり、燃焼期間は噴射期間の約2倍である。

(5) 本燃焼システムにおいて、 NO_x 濃度が高い(800 ppm 以上)レベルでは、サイクル最高ガス温度が低下するにつれて、 NO_x 濃度は低減する傾向にある。

(6) 正味熱効率を燃焼解析結果をもとに熱効率支配因子から算出した場合と燃料消費率、燃料の低位発熱量から算出した場合を比較すると、その差は、平均2%であり、本燃焼解析結果の精度は、非常に良好であることを確認できた。

本研究は、通産省の補助金を得て、(財)石油産業活性化センターが実施する技術開発事業の一環として実施したものであり、また、研究の遂行にあたっては、(社)日本陸用内燃機関協会、当社長崎研究所をはじめ多くの方々からのご協力、ご支援を得たことに対して、ここに深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 原田常雄・井元浩二・ほか3名, 新中央副室式ディーゼルエンジンの NO_x 低減研究 (第1報, 基本仕様の影響), 機論, 62-598, B(1996), 2534-2539.
- (2) 原田常雄・井元浩二・ほか3名, 新中央副室式ディーゼルエンジンの NO_x 低減研究 (第3報, 新水噴射方式適用), 機論, 62-603, B(1996), 4000-4006.
- (3) Millington, B. W. and Hartles, E. R., SAE Paper, No. 680590(1968), 1-17.
- (4) 原田常雄・井元浩二・ほか3名, 新中央副室式ディーゼルエンジンの NO_x 低減研究 (第2報, 燃焼システム改善), 機論, 62-601, B(1996), 3524-3531.