中速ディーゼル機関の低NO_x燃焼技術*

秋 本 成 太** 吉 川 滋**
米 澤 徹** 金 光 勸 次***

Techniques for Low NO_x Combustion on Medium Speed Diesel Engine

Seita Akimoto, Shigeru Yoshikawa, Tohru Yonezawa, Kanji Kanemitsu

Techniques for low NO_x combustion without degrading the specific fuel consumption were developed for the medium speed diesel engine. First concept for low NO_x is the reduction of high temperature combustion zone. Owing to this concept, the high-temperature combustion flame zone is reduced by the injection direction near to the piston surface. Second concept for low NO_x is the reduction of the flame temperature owing to the quick mixing of the high-temperature combustion zone and the low-temperature air portion. It is necessary to obtain the air motion which has the quick mixing of combustion zone and air portion. The air motion adopted in this study was the intake swirl induced by the intake valve with shroud. The medium speed engine with a bore of 280mm was used in the application of the new techniques for reducing NO_x emission. The engine based on the low NO_x techniques has the decrease in NO_x emissions by 40 % and almost the same specific fuel consumption compared with the base engine.

1. ま え が き

中速ディーゼル機関におけるNO_x規制は、陸用機関においては国内の大気汚染防止法 (NO_x < 950ppm) 以外にも大都市の自治体による厳しい規制が施行されており、NO_x排出量の少ないガス機関と高効率低燃費のディーゼル機関が、これらのNO_x規制値に応じて設置され、国内においては両者は層別されてきている。また、NO_x規制はIMO (国際海事機構) により、船用機関にも国際的に施行されようとしている。この規制値は決して厳しい値というわけではなく、NO_xを低減した結果として、NO_xとトレードオフ関係にある燃費の悪化が船用機関の運行費用アップを招くとして危惧されるものである。いずれにせよ陸・舶共に燃費を悪化させない低NO_x技術が必要不可欠になってくる。

本研究では、小形高速機関で得られた低NO_x燃焼コンセプト⁽¹⁾である(1) $\lambda = 1$ の燃焼領域の縮小、(2) 燃焼部分と空気との混合促進、の2つのコンセプトを中速機関に展開した。これらのコンセプトを実現するための具体的技術として、小形高速、中速の両機関の燃焼現象の相違を考察しながら低NO_x技術を提案し、研究用単気筒機関でその有効性を示した。

その結果、同一燃費でNO_xを約40%低減することができたので、以下に報告する。

2. 低NO_x技術

2.1 低NO_xコンセプト

ディーゼル機関の性能(出力、燃費、排ガス)を支配するディーゼル機関内の燃焼現象、いわゆるディーゼル燃焼は、燃料噴射に始まり、燃焼室内における燃料噴霧・混合気形成、着火、燃焼というプロセスを経過していく。図1には中形ディーゼル機関の燃焼過程を(1)燃焼初期、(2)燃焼中期、(3)燃焼後期に区分した場合の各段階における燃焼写真と各領域の温度に関するモデ

* 原稿受付 平成10年10月30日

** 正会員 ヤンマーディーゼル株式会社 (京都府乙訓郡大山崎町)

*** 財団法人石油産業活性化センター (港区虎ノ門4-3-9)

図1 低NO_xディーゼル燃焼コンセプト⁽¹⁾

図2 小形高速機関と中速機関との燃焼比較⁽²⁾

ル図を示す⁽¹⁾。

まず燃焼初期(1)において、圧縮された空気の中に燃料が噴射され、燃料と空気が最適な状態で混合した場所で勝手に火が着く、すなわち自己着火する。この時の燃料と空気との混合状態は空気過剰率 $\lambda =$

1の状態であり、燃料と空気が最適な状態で混合することを意味する。この燃焼状態は理論混合気燃焼で、非常に燃焼温度が高く、NO_x生成量が多い。

このため、まずディーゼル機関においては理論混合気燃焼($\lambda = 1$)が行われている領域を小さくする、

すなわち理論混合気燃焼 ($\lambda = 1$) 部分を縮小する必要がある。

次に燃焼中期 (2) においては、高温の理論混合気燃焼 ($\lambda = 1$) 部分は空気と混合しながら比較的緩慢に燃焼し火炎が成長する。燃焼していない空気の温度は低いため、燃焼部分と低温の空気との混合により燃焼温度は徐々に下がっていく。

このため燃焼部分と低温空気とを急速に混合すれば燃焼温度は早く低下し、NO_xを低減できると考えられる。

最後に燃焼後期 (3) においては、既に燃焼してしまった既燃部と最後まで燃焼に使われなかった空気とによって燃焼室空間は占められ、燃焼温度は低い。このためこの時期におけるNO_x生成量は少ない。

以上、燃焼温度が高い燃焼初期、燃焼中期に着目したNO_x低減のためのディーゼル燃焼に関するコンセプトを明記すると以下の様になる。

- (a) 理論混合気燃焼 ($\lambda = 1$) 領域の縮小
- (b) 燃焼部分と空気との混合促進

2.2 低NO_x技術 ここでは前述した二つのコンセプト (a) (b) に基づいて、具体的な低NO_x技術を導入していく。

2.2.1 理論混合気 ($\lambda = 1$) 領域の縮小 まず、大形ディーゼル機関の燃焼室内のどこで理論混合気燃焼 ($\lambda = 1$) 部分が存在しているのかについて検討する。図2は小形高速機関と中速機関との燃焼写真を比較したものである⁽²⁾。小形高速機関 (図の左側) では、ノズルから燃焼室壁面までの距離が短いため、燃焼初期の火炎は燃焼室壁面で形成されている。一方、中速機関 (図の右側) では、ノズルから燃焼室壁

図3 自由噴霧の混合気形成モデル⁽³⁾

面までの距離が長い、燃焼初期の火炎は発達した噴霧の周囲に形成されていることが判る。これらの燃焼形態の違いがNO_xにどのように影響しているのかについて更に解析した。

図3は燃料ノズルの一つの噴孔から噴射された燃料が、ノズルからどの程度離れた場所で理論混合気 $\lambda = 1$ の状態になり燃焼するかを表わすモデルと推定式である⁽³⁾。(1)式の左辺を $\lambda = 1$ と与えることにより、 $\lambda = 1$ となるノズルからの距離を求めることができる。この距離Xは、物性値あるいは代表的特性値を代入すると(一例として、燃料の密度 $\rho_f = 850\text{kg/m}^3$ 、圧縮空気の密度 $\rho_a = 15.6\text{kg/m}^3$ 、燃焼に必要な理論空気量 $L_{th} = 14.6\text{kg/kg}$ 、噴霧角 $\theta = 25\text{deg}$ 、流出係数 $C = 0.7$ と仮定した場合)、ノズル噴孔径に対して $X = 200 \cdot d$ と与えられる。すなわちノズル噴孔径の約200倍程度の位置で $\lambda = 1$ の理論混合気燃焼が行われており、NO_x生成はこの位置で活発になるものと推定される。更に図4は小形高速機関、ならび

図4 燃焼形態の比較

に中速機関における1つの噴孔の噴孔径とノズルから燃焼室壁面までの距離との関係を示したものであり、 $\lambda=1$ となるノズルからの距離(噴孔径 d に対して $X=200 \cdot d$)も図中に示している。小形高速機関では燃料ノズルから噴射された燃料が、理論混合気 $\lambda=1$ を形成する前に燃焼室壁面に衝突し壁面火炎を形成するが、中速機関においては多噴孔により相対的に噴孔径が小さく、かつ大形でノズルから壁面までの距離が長いので、噴射期間中絶えず理論混合気 $\lambda=1$ を生成しながら、放射状の火炎を形成することが推定される。高速機関に比べて、回転数の低い中速機関では滞留時間が長くなりNO_xが多量に発生すると云われているが、このような燃焼形態の違いも中速機関でNO_xが多い要因とも推測される。

そこで、燃料ノズルから噴射された燃料が理論混合気 $\lambda=1$ を形成する前に、燃焼室壁面に衝突させれば、理論混合気 $\lambda=1$ 燃焼部分を縮小することによって、NO_x生成を抑制できると考えた。

2.2.2 燃焼部分と空気との混合促進 燃焼部分と空気との混合を促進するためには、何らかの空気流動が必要になる。従来のこのクラスの中速機関では、小形高速機関における燃焼技術として当然の如く用いられているスワールを採用していない。しかし、あえて中速機関にもスワールを採用することによって、燃焼部分と空気との混合を促進し、NO_x低減を図ることができると考えた。

以上、2つのコンセプトに基づいた低NO_x技術に

ついてまとめると下記の様になる。

- (a) $\lambda=1$ の混合気を形成する前に燃焼室壁面に衝突させること。
- (b) 燃焼部分と空気との混合を促進するための適正スワールが必要。

3. 実験装置および方法

3.1 供試機関 運転に使用した機関は、シリンダ径280mmの中速機関で、その主要目、標準諸元を表1に示す。また燃料には市販のA重油を使用した。

3.2 スワール生成装置 空気流動としての吸気スワールはシャroudバルブにより与えた。図5は定常流試験装置で得られたシュラウドバルブの取り付け位置とスワール比および吸入空気量との関係を示したものである。吸気2弁のいずれか片方にシュラウドバルブを取り付けることで、シリンダヘッドを交換せずにスワールの変更が可能である。本試験では、現行の吸入空気量をできるだけ確保した条件で、スワール比を高めることが可能なシュラウド位置(S1+0)を求め、この時のスワール比約0.8に固定して実験を行った。

3.3 排気エミッション測定装置 排気成分であるNO_x、CO₂、CO、THC、O₂は堀場製作所製5成分分析計MEXA-9100Dを使用した。排気色(スモーク)濃度はボッシュスモークメーターにより測定し、ボ

図5 シュラウドバルブ取付位置

表1 機関主要目と標準諸元

機関名称	RN280
シリンダ数	1
シリンダ径×ストローク	280mm×380mm
総行程容積（L）	23.4 l
定格出力 kW（PS）	266（362）
定格回転数（rpm）	720
正味平均有効圧力（MPa）	1.90
平均ピストン速度（m／s）	9.12
PV値（MPa・m／s）	17.29

圧縮比		13.6
トップクリアランス		20mm
スワール		無し
燃焼室		浅皿形
燃料ノズル	噴孔数	9
	噴孔角	140°
噴射時期		13°bTDC（圧縮上死点前）

図6 標準諸元における噴射時期変更試験結果

ッシュユニット(BSU)で表示した。

4. 実験結果および考察

4.1 供試機関の噴射時期変更結果 図6は現行機関の標準諸元(表1)における定格出力(266kw/720rpm)時の噴射時期変更試験結果であり、噴射時期リタードによりNO_xは低減できているが、燃費、排気色が大幅に悪化していることが判る。

4.2 低NO_x諸元での実験結果 具体的な低NO_x化技術として、吸気スワール比を一定(=0.8)として与え、 $\lambda=1$ の混合気を形成する前に燃焼室壁面に衝突させることを狙って、燃料ノズルから壁面までの距離を短くするためにノズル噴孔角(ϕ)を図7に示す様に小さくした。

図8には、ノズル噴孔角を130°~150°まで変化した場合の定格出力における燃費、NO_x、排気色の関係を示す。高圧噴射でノズルから壁面までの距離が長いノズル噴孔角150°の場合には、噴霧の微粒化は良好と思われるが、スワールを与えると排気色の悪化が著しい。この理由としては高圧噴霧の微粒化とスワールによる空気流動により非常に希薄な混合気を形成し、この混合気は可燃限界範囲よりも薄いため未燃のまま排出されているものと考えられる。こ

図7 ノズル噴孔角 ϕ とピストンとの関係

のように従来の大形機関では燃費、排気色だけを考慮すればスワールの必要性は無く、逆に排気色が著しく悪化する。

ところがノズル噴孔角を小さくするほど($\phi=150^\circ \rightarrow 140^\circ \rightarrow 130^\circ$)、排気色は良好となり、特にノズル噴孔角130°の場合には改善効果が顕著である。図中にはノズル噴孔角130°で燃料噴射時期を進めた場合も示しており、現行機関で噴射時期変更した場合に比べ、燃費とNO_xとのトレードオフ関係が大幅に改善されている。例えば同一燃費で比較するとNO_xは約40%低減できていることが判る。壁面衝突により空気過剰率 $\lambda=1$ の領域が縮小したこと、また、スワールによりその燃焼部分と空気との混合が促進した

図8 低NOx技術採用時の噴射時期変更試験結果

ことによりNOxが低減でき、さらに壁面衝突による空気過剰率 $\lambda < 1$ の濃混合気の燃焼で生成されたすすが、スワールにより再燃焼(酸化)され最終的に排出されるすすが低減できたと考えられる。

5. 結 論

本研究では、小形高速機関で得られた低NOxコンセプトを中速機関に展開し、コンセプトを実現するた

めの具体的技術として、高速、中速の両者の燃焼現象の相違を考察しながら低NOx技術を提案し、研究用単気筒機関でその有効性を確認した。この結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 燃焼温度が高い燃焼初期、燃焼中期に着目した低NOxディーゼル燃焼に関するコンセプトは、理論混合気燃焼($\lambda = 1$)領域の縮小、燃焼部分と空気との混合促進である。
- (2) 上記コンセプトに基づいた中速ディーゼル機関の低NOx技術は、 $\lambda = 1$ の混合気を形成する前に燃焼室壁面に衝突させるための、ノズルから壁面迄の距離が短くなる噴射方向、および燃焼部分と空気との混合促進のための適正スワールである。
- (3) 低NOx技術により、燃費とNOxとのトレードオフ関係が大幅に改善され、同一燃費でNOxは約40%低減できた。
- (4) 壁面衝突による濃混合気の燃焼で生成されるすすは、スワールにより再燃焼(酸化)されると考えられ、低NOx技術により排気色も改善できた。

参 考 文 献

- 1) S. Yoshikawaほか5名, The Development of Low NOx Emission Diesel Engine, CIMAC (1995), D28
- 2) J. F. Alcock and W. M. Scott, Some More Light on Diesel Combustion, Proc. I. Mech. E., No5, (1962), 179-200
- 2) 和栗ほか3名, 機論, 25-156, (1959), 820