ディーゼル機関の燃焼後期かく乱による
黒煙および NO_x の同時低減に関する研究*村山 正^{*1}, 近久 武美^{*1}, 山根 浩二^{*2}Reduction of Smoke and NO_x Emissions by Active Turbulence
Generated in the Late Combustion Stage in D. I. Diesel Engine

Tadashi MURAYAMA, Takemi CHIKAHISA, and Koji YAMANE

The purpose of this study is to achieve simultaneous reduction in smoke and NO_x emitted from diesel engines. Generally, there is a trade-off between smoke and NO_x emissions, and a simultaneous reduction in both is difficult to realize. Generating strong turbulence late in the combustion period was attempted, to enhance smoke oxidation without disturbing the initial combustion stage where NO_x formation is dominant. The turbulence was generated by jets of burned gas from an auxiliary chamber installed in a direct injection diesel engine. For the reduction of NO_x , exhaust gas recirculation (EGR) was combined with strong turbulence in the combustion chamber at a slightly retarded fuel injection timing. The experiments were very successful in reducing smoke in particular, as well as NO_x . Thermal efficiency was improved at full loads. The paper describes the effect of various operating conditions and combustion chamber configurations.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Combustion, Emission Control, Nitrogen Oxides, Smoke, Turbulence, Mixing, EGR

1. ま え が き

ディーゼル機関から排出される黒煙と NO_x に対する規制の強化に伴い、その同時低減を目ざして多くの研究が行われているが、両者は通常トレードオフの関係にあるため、いまだ有効な手段は見いだされていない。

黒煙と NO_x とを同時に低減させるためには、空気と燃料の混合を良好に保つことに加えて、初期燃焼の緩和、拡散燃焼の活性化、および燃焼期間の短縮化が必要と思われる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。ところが、拡散燃焼は膨張行程で生じるために、その時点では、吸入スワールなど、圧縮行程中に与えた乱れは減衰してしまい、その燃焼活性化に対する効果は比較的小さくなってしまう。

そこで、本研究では燃焼かく乱室(Combustion Chamber for Disturbance, 以下 CCD と略す)と名付けた小さな燃焼室を直噴式ディーゼル機関のシリンダヘッドに設置して、そこから噴出する燃焼ガスによって積極的に燃焼後期にかく乱を起こし、それが黒煙および NO_x の同時低減に対して及ぼす効果を明らかに

することを目的として一連の実験を行った。

なお、類似した機構をもつものとして、トーチ着火方式⁽⁴⁾、あるいはパイロット噴射方式⁽⁵⁾があるが、いずれも多種燃料適用に主眼を置いたものであって、目的とする効果が大きく異なっている。また古くから用いられてきた空気室式機関⁽⁶⁾あるいは神本らが提案した空気室⁽⁷⁾は多少目的が類似しているが、かく乱の程度が弱かったり、その発生時期を任意に制御できておらず、本方式はより積極的にかく乱を行っている点が大きく異なっていると言える。

実験の結果、燃焼後期にかく乱は特に黒煙の低減に対して極めて効果的であり、一方、 NO_x に対してはそれ自体、ほとんど影響を及ぼさないが、EGR や噴射時期遅延などの NO_x 低減手法と組合せることによって、黒煙と NO_x の大幅な同時低減が可能になったことが明らかとなった。

2. 実験装置および方法

実験に使用したベース機関は、水冷、立形、単気筒無過給の四サイクル直噴式ディーゼルエンジン(ボアストローク $\phi 110 \times 150$, 定格出力 7.36 kW/1 200 rpm)である。この機関に、図 1 に示すような小さな副室(CCD)を付加した。CCD の容積割合は、すきま容積の

* 昭和 63 年 7 月 13 日 第 7 回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演。原稿受付 昭和 63 年 10 月 12 日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北 13 西 8)。

^{*2} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

約7%とし、主燃焼室と細いガス噴出孔で連絡した。さらに、主燃焼室には低燃費で、かつ排気レベルが低いとされているリエントラント形を採用し、基準となる機関の性能が極力良好なものとなるように工夫した。主燃料および CCD 噴射は連結された2台の噴射ポンプにノズルをそれぞれ接続して行った。なお、両噴射燃料は、JIS 2号軽油であり、負荷の調節は主噴射燃料量によって行った。

供試機関の吸入スワールは零、体積効率は0.86である。また、ノズルにはロングホールノズルを用い、ノズル開弁圧は24.5 MPa、噴射角度は図2および図3に示すように 80° あるいは 120° とした。一方、ノズル総噴孔面積は穴数のいかにかわらず 0.18 mm^2 一定としたが、噴射期間は1200 rpm、BMEP 0.5 MPaで約 18° CA であった。

CCD方式では、上死点前の適当な時期に主燃焼室内へ燃料を噴射し、主燃焼が開始してから CCD 内へ少量の燃料を噴射して、その燃焼ガスの噴出によって拡散燃焼の後期をかく乱させる仕組みとなっている。排気中の NO_x および未燃炭化水素(THC)の測定には自動車用排気測定装置(CLDおよびH-FIA)を、また黒煙には、ボッシュ式スモークメータをそれぞれ使用した。なお、排気管測定位置による値のばらつき⁽⁸⁾を防ぐために、測定位置直前に排気ミキシング室を取付けて測定を行った。

一方、EGRは高温循環とし、排気の一部を二方コックを介してパイプで直接吸気管へ導いた。循環率(EGR%)は排気中に対する吸気中の CO_2 濃度の比を用いて算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 排気物質に対する燃焼後期かく乱の効果

図2は、主燃料のみを噴射した場合(図中 without

図1 燃焼後期かく乱用試作燃焼系の構造

CCD Injection), および全噴射燃料の20%程度を CCD に噴射した場合(with CCD Injection)において主噴射時期の変化に対する NO_x 濃度、黒煙濃度、および正味燃料消費率を比較した結果である。

図2において、主燃料のみを噴射した場合には、噴射時期の遅延に伴って NO_x は大幅に減少するが、 15° CA 付近から黒煙が急激に増加し始め、 NO_x と黒煙の典型的な相反した排出特性が示されている。なお CCD のない改造前の燃焼室でも同様な性能となることが確認された。これに対して、CCD 噴射を行った場合には、

噴射角度 $\theta: 120^\circ$, ノズル穴数: 4, BMEP: 0.37 MPa
(空気過剰率: 約2.3), 1200 rpm, CCD 噴射割合: 20%

図2 主燃料噴射時期の影響

図3 機関回転速度および負荷の影響
(噴射角度 $\theta: 80^\circ$, ノズル穴数: 4,)

噴射時期を遅延させても黒煙の増加は認められず、ほぼ無煙状態となっている。さらに、 NO_x レベルも CCD 噴射を行わない場合に比べて、むしろ若干低下している。一方、燃費に関しては、いずれの場合もほとんど変わらず、 9°CA 付近から若干悪化する傾向が認められる。

したがって、燃焼の後期かく乱は主燃料噴射時期の遅延と組合せることにより、 NO_x と黒煙の同時低減に対して極めて効果的であると言える。

つぎに、機関回転速度ならびに機関負荷を変化させて、燃焼後期かく乱の効果を調べてみた。図3は、空気過剰率を横軸にとり、縦軸には、 NO_x 、黒煙濃度、燃費、CCD 燃料噴射割合、および未燃炭化水素濃度を示したものである。図3からいずれの回転速度においても、広い負荷範囲にわたって CCD による NO_x および黒煙の顕著な低減効果が認められる。特に黒煙に関しては、空気過剰率が2付近まで完全に無煙な状態が保たれ、空気過剰率が1.2程度となっても、Bosch 濃度2(20%)以下となっている。一方、 NO_x に関しては、低回転速度ほど、CCD による低減の効果が明確になっているが、その差は比較的小さい。ただし、燃費に関しては、中・高負荷では改善されているものの、低負荷時では悪化しており、未燃炭化水素も低速・低負荷時には、極度に増加している。これは、CCD 内への燃料

噴射量を負荷のいかんにかかわらず一定としたため、低負荷では CCD 燃料噴射割合が相対的に高くなったことに加えて、CCD と主室とを結ぶ連絡孔が長過ぎることによるものと考えられる。

したがって、CCD 方式は特に中・高負荷時の課題である黒煙低減に対して極めて効果的であるが、熱効率および HC の観点から、低負荷時には CCD 内への噴射を行わないほうが好ましいことが明らかとなった。

つぎに、CCD 方式による黒煙低減のメカニズムを明らかにするために、インジェクタ線図の解析を行った。図4は、CCD 噴射時期を変えた際の熱発生率およびシリンダ内平均温度を示したものである。なお、CCD 噴射を行った場合にはいずれの噴射時期においても大幅な黒煙の低減が認められ、特に上死点後 15°CA 付近で、最良噴射時期を示していた。

CCD 噴射時期が 5° および 15°CA では CCD 噴射を行わない場合に比べて、燃焼が比較的短い時間で終了しており、かく乱による燃焼促進の効果が認められる。一方、CCD 噴射時期が $20\sim 25^\circ\text{CA}$ に遅延した場合には燃焼が長引いているものの、黒煙は CCD 噴射をしない場合に比べて低く、かく乱によってすすの再燃焼が依然盛んであることが推定される。このほか、CCD 噴射時期が 15° において、シリンダ内平均温度が最も高くなっており、かく乱の効果に加えて CCD から噴出する燃焼ガスによって燃焼後期が高温化される効果も併せて示唆されたが、この点に関しては、まだ不明な点が多い。

3.2 主燃焼室形状および噴射系諸元が燃焼後期か

図4 熱発生率、および作動ガス温度経緯に対する CCD 噴射時期の影響

主噴射時期: -9°CA , BMEP: 0.37 MPa
 (空気過剰率: 約 2.3), 1200 rpm, CCD 噴射割合: 約 20%
 CCD 噴射時期: 20°CA

図5 主燃焼室形状および噴射系の影響

図 6 CCD方式と排気再循環の併用による NO_x および黒煙の同時低減効果

く乱の効果に対して及ぼす影響 良好な排気改善効果が得られたとする報告の中には、ベースとなる機関の性能が悪いために改善効果が生じ、良好な機関に対してはむしろ逆効果である場合もしばしば認められる。そこで本節では燃焼室形状や噴射系諸元を種々変化させて、燃焼後期かく乱の効果について調べてみた。

図5は、2種類のリエントラント形燃焼室および燃料噴射方向において、噴孔数を変えた際の結果である。図5から、黒煙に関してはいずれの場合にもCCDによる大幅な低減効果が認められる。一方、 NO_x はCCDを用いることにより若干低下しているものの、その低減効果は比較的小さい。ただし、その濃度レベルは燃焼室形状により大きく異なっており、本実験では平底燃焼室が全体的に良好な排気特性を示していることがわかる。

なお、本実験における最良燃費は図3に示されるごとく、 $250 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (熱効率 32%) となっており、単筒エンジンであることを考慮すると、ベースとなっている機関の燃焼状態は比較的良好であると言える。

したがって、以上の結果から、燃焼室形状および噴射系によって排気濃度や燃費は変化するものの、燃焼後期かく乱の効果は燃焼室形状や噴射系の諸元にかかわらず存在するものと言える。

3.3 燃焼後期かく乱と排気再循環の併用による NO_x の低減効果 図6は、CCD方式、およびそれに排気再循環 (EGR 率: 11%) を併用したそれぞれの

場合について、 NO_x 、黒煙、燃費、および体積効率 η_v を空気過剰率に対して示した結果である。なお、図6中には両運転方法における同一出力 (BMEP) の点を細線で結び示してある。

図6から、CCD方式にEGRを併用することによって、広い範囲の空気過剰率において NO_x 濃度が大幅に低減されており、その程度は特に高負荷で著しいのがわかる。一方、黒煙はEGRを行っても全く変化しておらず、EGRによって燃焼が阻害されないことが示唆されている。ただし、EGRによって体積効率は大幅に低下しており、その分、同一平均有効圧では空気過剰率の低いほうに移動するため、燃料消費率は低負荷域で見掛け上悪化しているほか、最高出力の低下が生じている。

以上のことから、CCD方式に対してEGRを併用することによって、 NO_x を大幅に低減し得ることが明らかとなった。またこの場合、EGRによって体積効率が低下するが、燃焼自体は悪化しておらず、過給などによって体積効率の低下を補えば、黒煙の少ない低 NO_x 燃焼を期待し得ることが明らかとなった。なおEGR率に関する実験の結果、体積効率の低下および NO_x の低減効果などの兼ね合いから、自然給気の場合には、EGR率は約5%程度とするのが良いことが示された。

4. 結 論

(1) 燃焼後期に導入した強力なかく乱は黒煙の低減に対して極めて効果的である。

(2) 主燃焼室形状や噴射系諸元を変化させても、燃焼後期かく乱による黒煙の低減効果は損なわれない。

(3) 燃焼後期かく乱のために用いた本CCD方式では低負荷における燃費および未炭化水素の増加が生じるため、この負荷域での使用を避ける必要がある。

(4) CCD方式に対して、排気再循環を併用することによって、黒煙を悪化させずによりいっそう NO_x 濃度を低減することができる。ただし、この場合、体積効率の低下を過給などにより補う必要があるが、5%程度のEGR率であればその影響は比較的小さい。

本研究は、日本機械学会 RC 86、および服部報公会の援助によって行った。また、エンジンの試作に際しては、久保田鉄工(株)の多大な協力を得た。さらに、実験の遂行にあたっては、徐美伶客員研究員(中国、鎮江船舶学院)、難波茂之君(現・北海道ガス(株))、衣沢喜

幸君〔現・(株)豊田自動織機製作所〕の協力を得た。
ここに特記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 村山・ほか2名, 機論, 44-381(1978), 1706.
 - (2) 塩路・ほか1名, 第6回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1987-1), 71.
 - (3) Matsui, Y., ほか2名, SAE Trans., No. 820464(1982).
 - (4) LoRusso, J. A., ほか3名, Proc. IMechE., 200-A1(1986), 21.
 - (5) Chikahisa, T., ほか2名, SAE Trans., No. 811375(1981).
 - (6) 長尾, 内燃機関講義(上), (1976), 301, 養賢堂.
 - (7) 神本・ほか2名, 機論, 50-453(1984), 1363.
 - (8) 山根・ほか2名, 自技会論文集, No. 39(1988), 38.
-