

直接噴射式ディーゼル機関における NO_x 抑制のための一実験

堀 保 広*・辻 歌 男*

An Experiment to control Exhaust Emissions of a Direct-Injection Diesel Engine

By

Yasuhiro HORI and Utao TSUJI

Abstract

This paper reports running results of the Diesel engine reformed a deep-bowl type combustion chamber. The combustion system provides grooves around the combustion chamber, which gives swirl to the air pushed into the chamber before top dead center and intense turbulence to the burnt gas blown out of the chamber after top dead center. This reformation of the combustion chamber enables the combustion of the engine to control and NO_x exhaust emissions to decrease considerably without increase of fuel consumption by selection of proper fuel injection timing.

1. 結 言

ディーゼル機関においては、主として問題になる有害排気成分は NO_x である。しかし、通常 NO_x の抑制は燃焼を悪化させ、未燃焼成分が増加するので、燃料消費率も増加するのが普通である。CO の抑制策は他の未燃焼成分にも通用するので、結局ディーゼル機関の排気対策は NO_x と CO の同時抑制策に帰する。両者を同時に抑制するためには、NO_x については燃焼温度を下げるか燃料過剰状態で燃焼させ、CO については空気過剰状態で燃焼させればよいことが知られており、ディーゼル機関においては、ピストンが上死点付近にある高温時には燃料過剰状態を保って NO_x を押さえ、膨張行程の温度が少し低下した状態で二次燃焼用の空気を混合させて CO をも減少させる二段燃焼が考えられ、排気対策の一つとしてその基礎的な研究が行われている^{1),2)}。実際に、この二段燃焼は副室式機関において実現しているとされ、NO_x 抑制の効果が認められている。しかし、噴口での絞り効果のために燃料消費率の増加を避けることができな

い、の熱負荷が高くなるために、副室式をシリンダ内径の大きい機関に採用することは難しいといわれている。

現在、直接噴射式機関に応用して、最も効果的、実用的と考えられるのは、燃料噴射時期遅延法であるが³⁾、この方法においても、燃料消費率の増加を伴う。最近、水分添加燃焼法を燃料噴射時期遅延法と併用して、顕著な効果のあることが報告されているが⁴⁾、添加した水分によって起きる問題の解決が残されている。二段燃焼法については、燃焼室の構造上、直接噴射式機関でその実現をはかることは基本的に困難な問題を抱えているので、最初の独創的な燃焼室⁵⁾ が発表されたのは以前のことであり、この種の新しい燃焼室設計の努力はなされているであろうが、其の後実用にまで至ったのを聞かない。ここでは、あえて二段燃焼によって、直接噴射式機関の長所である燃料消費率の良さをできるかぎり損うことなく NO_x を抑制することを意図し、新しく設計した数種類の燃焼室の中で比較的良い成績を示したものの実験結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 装 置

実験機関は、AVL (オーストリア内燃機関研究所)

* 機関性能部

原稿受付：昭和55年7月31日

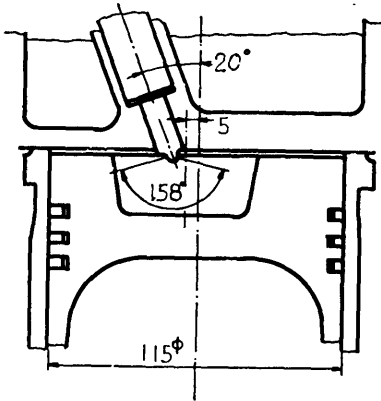


図-1 燃焼室まわり

502 形機関を基礎に、シリンダ内径 115 mm、行程 120 mm、最高回転数 2800 rpm、圧縮比 16.5 の自動車用機関の部品を組み付けて完成させた単筒機関である。図-1 に、この機関の燃焼室まわりの様子を示した。燃料は軽油。噴射弁は、噴口が径 0.3 mm で 5 孔、噴霧角が 158 度のものを使い、開弁圧を 235 kg/cm² とした。噴射ポンプは、特注した各プランジヤの径を異にするボッシュ PE 4 P 形で、その中の径 9 mm のプランジヤを使った。

排気の NO と NO_x 成分はケミルミネッセンス式分析計（ベックマン 951 H 形分析計）、CO 成分は非分散形赤外分析計（ベックマン 赤外分析計）、燃料消費量は燃料タンク出口の流量をオーバル歯車式流量計（オーバル機器工業社 LP414-630-C118）で測定した。

2.2 燃 焼 室

図-2 a は、実験機関の、標準として設計された深皿形燃焼室で実用されているものである。同図 b は、二

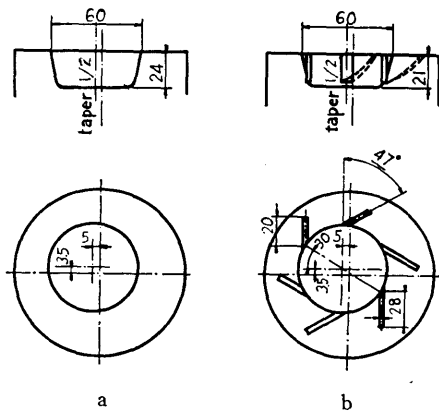


図-2 標準燃焼室 a と改造燃焼室 b

段燃焼を行わせるために設計された燃焼室で、深皿形の主燃焼室の容積を標準形のもの 90% とし、その減少分の容積を主燃焼室周囲の、半径方向と 47 度*の傾きを持つ 6 本の溝に分配して、二次燃焼用の空気だまりとした。高軸平均有効圧時に、主燃焼室内では燃料過剰状態での燃焼を行い、その際生じた未燃焼成分を、ピストンが下降を始め、主燃焼室の燃焼ガスが溝を通過してすき間部に吹き出す過程で生じる乱れを利用して、溝部およびすき間部との空気と混合させて、燃焼させ処理しようとするものである。以下、これらを標準燃焼室および改造燃焼室と呼ぶことにする。

2.3 方 法

上述の 2 種類の燃焼室を持つピストンで実験機関を運転し、等 NO_x 線図、等 CO 線図、等燃料消費率線図を作って両者での燃焼結果の差を概観し、ついで両者の燃料消費率と NO_x 量との関係を比較して改造効果を評価し、それらの差を生じる原因究明の一手段として熱発生率の経過を調べた。

3. 実 験 結 果

3.1 等 NO_x 線図、等 CO 線図、等燃料消費率線図

図-3 a, b, c に燃料の噴射時期を上死点前 26 度に固定し、負荷を変えて両燃焼室で運転したときの測定結果を比較して示した。同図の a は等 NO_x 線図、b は等 CO 線図、c は等燃料消費率線図で、細線で標準燃焼室の場合を、太線で改造燃焼室の場合を表わした**。各等高線は、簡単のために、各測定点間に比例則が成立するものとし、補間して得たものであり、また測定点の数も十分に多くはとらなかったため、細部においては正確さに欠けるうらみがあるであろうが、両燃焼室による広い運転範囲内での燃焼の差はよく表現され、それを概観することができる。

等 NO_x 線図において、標準燃焼室では、燃料噴射時期が固定されているので、回転数が高くなると、燃焼時期が遅れるうえに、燃焼時間も短くなるので、高温部分が少なくなって NO_x は減少する。一定回転数では、軸平均有効圧の高い所では部分的な燃料過剰状態の燃焼で酸素不足のために、低い所では空気過剰状態の燃焼で低温度のために、ともに NO_x が減少して、中間の軸平均有効圧の所で極大値をとる。標準燃

* 特別の意味を持つ値ではなく、これ以上の角度にすると、フライスが燃焼室対称位置の縁を削ることになる。

** 以下の各図においても同様の表現法をとる。

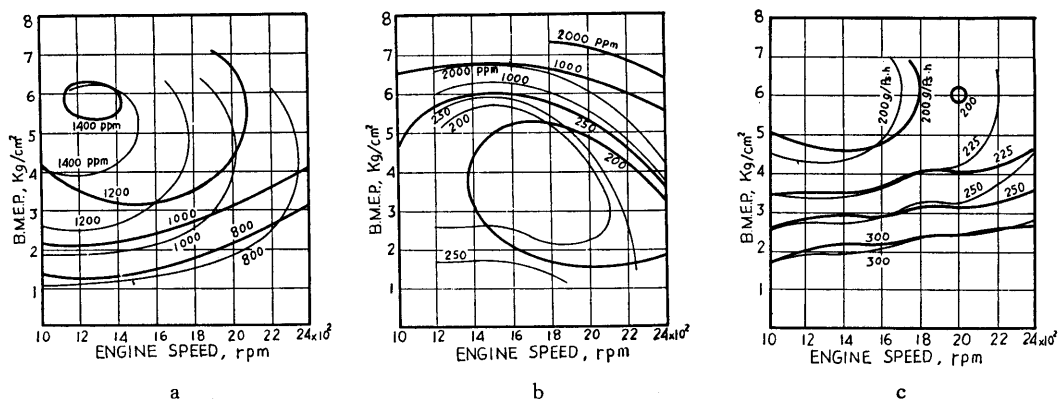


図-3 標準燃焼室(細線)と改造燃焼室(太線)の等 NO_x 線図 a, 等CO線図 b, 等燃料消費率線図 c

燃焼室に比べて、改造燃焼室では、 NO_x の値は低回転数では低いが、高回転数では、主燃焼室の容積が小さいにもかかわらず、かえて高くなっていることが注目される。すなわち、1400 ppmの線はおよそ(1380 rpm, 6.1 kg/cm^2)の点で、1200 ppmの線は(1600 rpm, 3.2 kg/cm^2)、1000 ppmの線は(1900 rpm, 2.9 kg/cm^2)、800 ppmの線は(2250 rpm, 2.8 kg/cm^2)の点で交叉し、それらの交叉点以上の回転数では改造燃焼室の方が NO_x の値が高い。

等CO線図においては、ほぼ等 NO_x 線図に対応して、高回転数領域においては改造燃焼室のCO濃度が低く、低回転数中軸平均有効圧領域においては高い。例えば、1000 ppmの線を見ると、改造燃焼室の線は標準燃焼室の線に比べて、回転数1600 rpmでは軸平均有効圧が約 0.5 kg/cm^2 高い所にあり、回転数の増加と共に、この線の低下は小さく、2400 rpmでは両線間の差は約 2 kg/cm^2 になっている。標準燃焼室の200 ppmの線が囲む領域の中で、改造燃焼室の200 ppmの線が囲む領域を除いた低回転数領域部分では、改造燃焼室のCO濃度は高い。しかし、両燃焼室の250 ppmの線は1500 rpm付近以下では、ほぼ同じ値をとっており、両燃焼室のCO濃度差は大きくない。

等燃料消費率線図においては、改造燃焼室の燃料消費率は、標準燃焼室のそれに比べて、低回転数、中軸平均有効圧の領域でやや劣るが、高回転数、高軸平均有効圧の領域では著しくすぐれている。

3.2 燃料消費率— NO_x 特性

前述したように、 NO_x の抑制をはかる場合、未燃焼成分が増加したり、燃焼時期が遅れて燃料消費率が

増加するので、ある NO_x 抑制策が効果的であるかどうかは、燃料消費率の増加の程度をあわせ考えなければならぬ。ここでは、前述したように、現状では最も効果的で実用的でもありと考えられる燃料噴射時期遅延法による標準燃焼室の抑制効果を基準にとって、改造燃焼室の抑制効果を評価した。

図-4中の曲線は、空燃比と回転数を一定とし、燃料噴射時期を変えて測定した燃料消費率と NO_x 濃度との関係を示したものである。太線が細線の左側の領域にあれば NO_x の抑制効果があると判定する。燃料噴射時期は上死点前10度と同30度の間を変化させ、機関回転数に応じて適当な範囲を選んだ。

得られた結果では、いずれの場合も太線は細線の左側にあり、燃焼室改造による NO_x の抑制効果があると云える。とくに、高回転数において、その効果が著しい。

3.3 燃焼過程

図-5は、ピエゾ水晶式インジケータ(パイプロメータ社8QP-500a)で採取したシリンダ内圧力の測定例で、空燃比20、回転数2400 rpm、燃料噴射時期が上死点前26度の場合で、100サイクルの平均値が示してある。

図-6は、このようなインジケータ線図より計算した、回転数1600 rpmの場合のシリンダ内での熱発生率*の経過を示したものである。aは空燃比20の場合で、燃料噴射時期が上死点前26, 22, 18, 14度の四つの場合が示してある。同図bは空燃比38の場合のものである。図-7 a, bに、2400 rpmの場合を、同様に示した。

* 熱伝達による冷却損失は加えられていない。

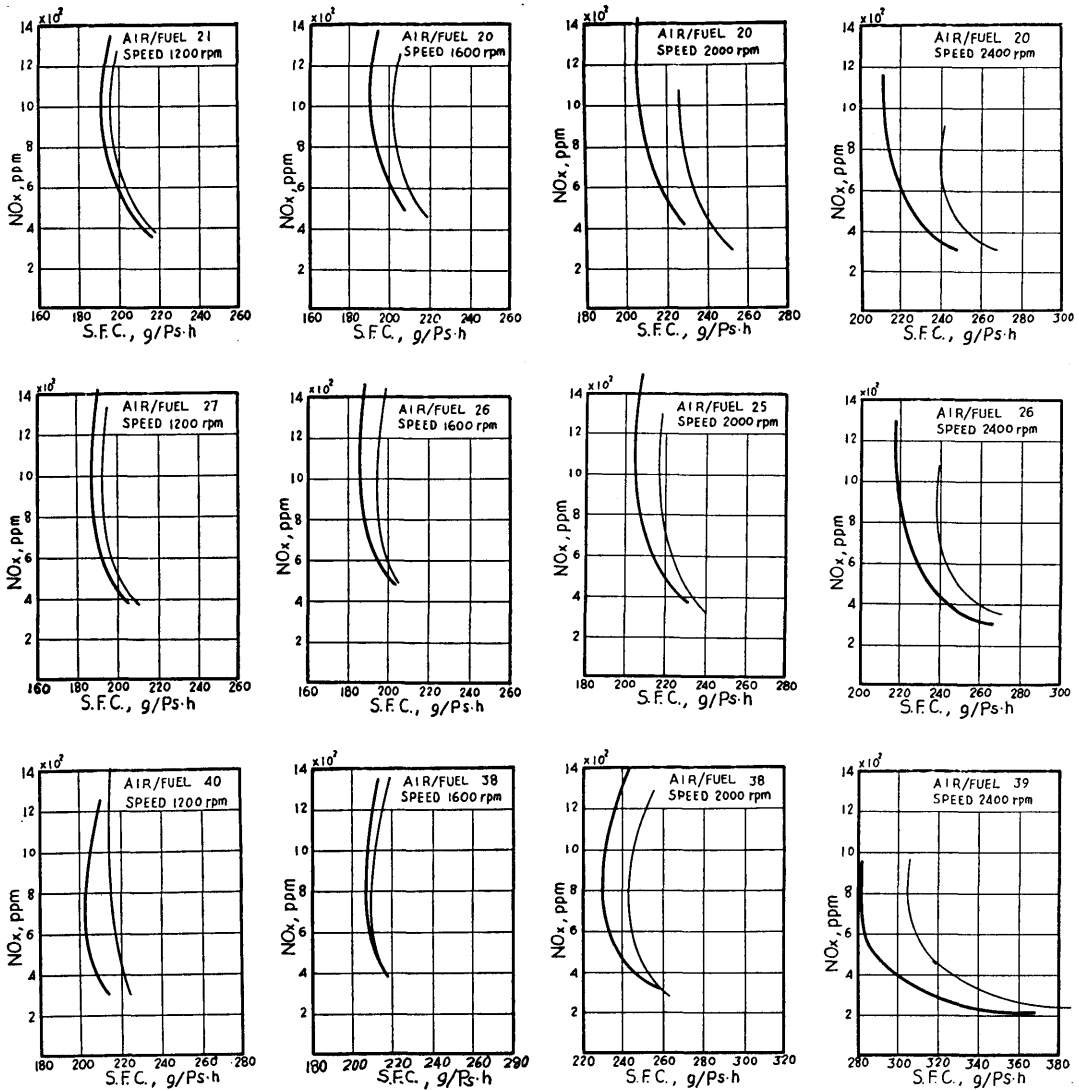


図-4 燃料消費率—NO_x 濃度特性
細線：標準燃焼室，太線：改造燃焼室

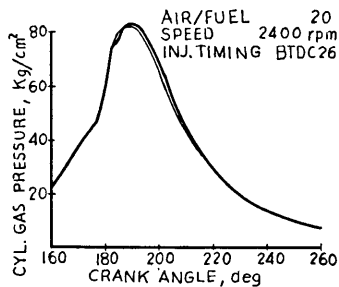
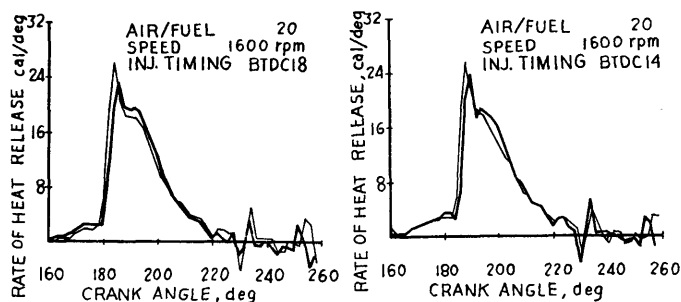
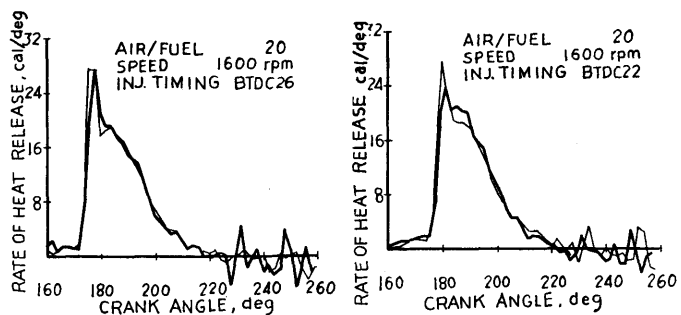
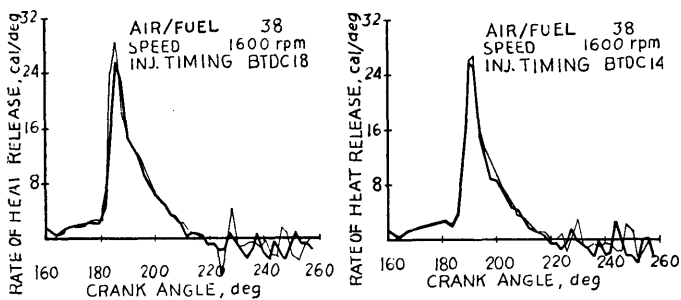
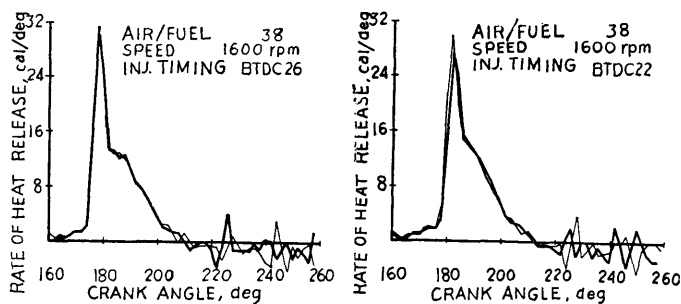


図-5 インジケータ線図
細線：標準燃焼室，太線：改造燃焼室

回転数 1600 rpm 空燃比 20 の場合，注目すべきことは，燃料噴射時期 22 度の場合が代表するように，改造燃焼室では燃焼初期の予混合燃焼部分が少なく，主燃焼となる拡散燃焼部分のピークが高く，中期の熱発生率が高いことである。上死点前 18 度と 14 度の噴射の場合には着火が遅れているが，主燃焼部分の燃焼のよいことは変わらない。燃焼中期の熱発生率の高いことが，図-4 の中に示されている回転数 1600 rpm 空燃比 20 の場合に，燃料消費率を低くしている原因であると考えられる。空燃比の大きい 38 の場合には，



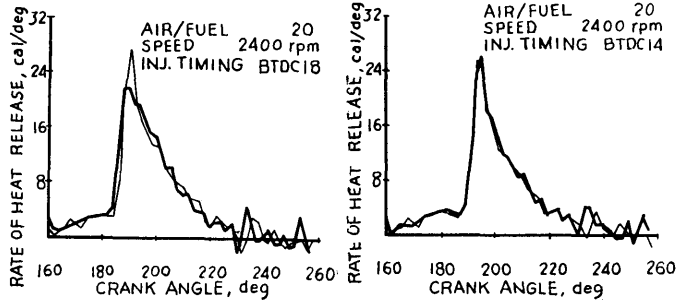
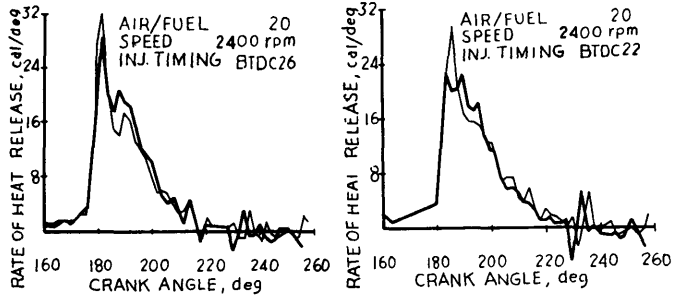
a) 空燃比 20



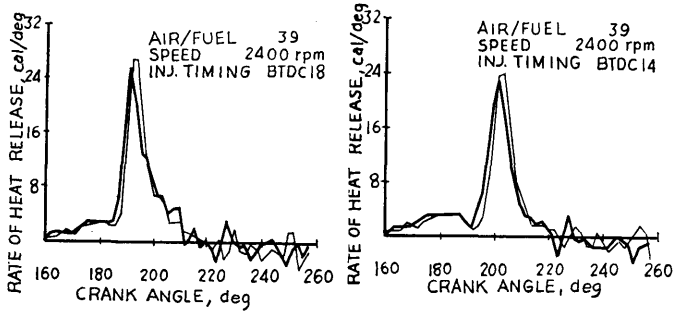
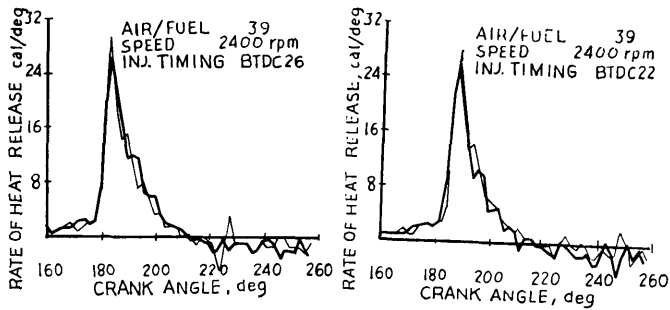
b) 空燃比 38

圖-6 熱發生率曲線

細線：標準燃燒室，太線：改造燃燒室



a) 空燃比 20



b) 空燃比 39

圖-7 熱發生率曲線
細線：標準燃燒室，太線：改造燃燒室

このような差は目立たない。

回転数 2400 rpm 空燃比 20 の場合は、前述の 1600 rpm, 20 の場合に見られた改造燃焼室による燃焼の特徴が一そう顕著に現われる。1600 rpm の場合と違うところは、燃料噴射時期の遅い上死点前 18 度と 14 度の着火の遅れが見られないことである。空燃比の大きい 39 の場合、上死点前 26 度と 22 度の噴射では、初期のピークは低いけれども、それ以後の燃焼のよいこと、上死点前 18 度と 14 度の噴射では着火が早く、上死点直後の燃焼のよいことが、燃料消費率を下げることに寄与しているようである。

4. 結 論

1. 二段燃焼によって直接噴射式ディーゼル機関の NO_x 抑制を行うために、深皿形の主燃焼室の周縁と斜交する溝を持つ改造燃焼室をピストン頂部に作り、同じ圧縮比の標準の深皿形燃焼室を持つものとの、 NO_x 抑制効果の比較実験を行った。

2. 当初考えていた、空燃比の小さいすなわち軸平均有効圧の高い所における NO_x の抑制の意図に反して、高回転数領域においては、かえってその増加をきたした。しかし、その領域での改造燃焼室の燃料消費率は著しく改善され、それを標準燃焼室の場合と同じ値になるまで燃料噴射時期を遅らせると、 NO_x の値を半分程度とすることができる。低軸平均有効圧時においても、燃料消費率が低く、噴射時期を遅らせることにより、 NO_x を半減させることができる。

3. 低回転数領域においても、高回転数領域におけると同様に、燃料噴射時期を遅延させて NO_x を低減させることができる。しかし、燃料消費率の改善の度が小さいので、高回転数領域におけるほどには低減をはかり得ない。

4. 標準、改造両燃焼室によるシリンダ内の熱発生率の経過の差は、回転数が高く、空燃比の小さいときに顕著に現れる。最も特徴的なことは、改造燃焼室では初期の予混合燃焼部分が少なく、主燃焼となる拡散燃焼部分の熱発生率が高いことである。このことは、主燃焼室と溝部の容積比、溝の数と方向、燃料噴射の方法などの組み合わせを変えることによって、直接噴射式ディーゼル機関の燃焼を制御し、単に有害排気成分の低減だけでなく、他の性能改善が可能であることを示唆しているように思われる。ここで行ったのは、二段燃焼による NO_x 抑制を意図した一実験にすぎない。簡単なこれだけの実験からだけでは、得られた成果が、果して二段燃焼による効果によるものであるかどうかも明確に得ないが、これがきっかけとなって、上述の実験パラメータを変えての実験の積み重ねによって、燃焼機構の解明と機関性能のいっそうの改善がなされればさいわいである。

終りに当って、実験機関の設備に関して、懇切なご指導を頂きましたお手を煩わした、いすゞ自動車株式会社開発本部の辻村欽司主査および同部員の方々に心から感謝の意を表したい。

なお、ここで示した熱発生率の計算は、当所共用計算機 Tosbac-5600 によったものである。

参 考 文 献

- 1) 小笠原ほか 2 名, 機論, 39-327, 昭 48-11, 3432
- 2) 小笠原ほか 3 名, 第 15 回 JARI 研究集会前刷集, 昭 50-1, 17
- 3) 金原ほか 2 名, 機講論, 730-5, '73-4, 31
- 4) 三橋ほか 5 名, 三菱技報, 15-2, 昭 53-3, 238
- 5) Dooley J. L., Automotive Engineering, 79-9, '71-9, 53