

ディーゼルエンジンにおける EGR 第2報*

— 吸気絞り EGR について —

常 本 秀 幸**

石 谷 博 美**

(昭和 53 年 4 月 14 日受理)

The Effect of EGR of Diesel Engine Part 2

— Intake Throttling EGR —

by Hideyuki TSUNEMOTO and Hiromi ISHITANI

In order to put the EGR system in a diesel engine to practical use, it is necessary to improve a compact one.

For this purpose, the EGR system where the induction line was throttled, i.e. intake throttling EGR, can be expected to make smaller by increasing the gas speed in the EGR pipe line.

It became possible by means of this improvement to decrease the diameter of the EGR pipe to $1/2 \sim 1/3$ when compared with the standard EGR system.

However, a sound level became higher and the fuel consumption was increased.

This system works effectively when carrying a light load but the smoke level became worse when carrying a high load.

1. ま え が き

ディーゼル機関の排気ガス、燃費率はガソリン機関にくらべ優れているという事から、最近乗用車のディーゼル化が進められている。しかし、 NO_x は米国で実施されている LA-4 走行時の測定結果を見ると $1.5 \text{ g/mile}^{1)}$ 近い値になっており、10 モード値に換算すると 1.0 g/km 程度の値になる。現在ディーゼル乗用車にはトラック同様、濃度規制が適応されているが、ガソリン乗用車に対する NO_x 規制値が適応されれば、現状では約 $1/4$ に低減しなければならない。

ディーゼル機関の NO_x 低減方法としては、噴射時期の変更、水噴射²⁾、燃焼室の改良^{3),4)} 等があるが、EGR (排気ガス再循環) も実用化を考えた研究が必要となる。ここで、EGR を実用化しようとするのと耐久上解決しなければならない問題も多いが、コントロール方法にも問題

* 自動車技術会昭和 52 年度秋季学術講演会で発表 (1977 年 12 月 名古屋)

** 北見工業大学機械工学科

がある。特に乗用車で使用頻度が高い軽負荷で EGR 効果を高めようとする、多量の還流ガスが必要となり、システムが大型化する。この事より本実験では、吸気を絞る事により吸気管の負圧で EGR システム内の速度を高め、同時に EGR を行いシリンダ内吸入酸素濃度の変化割合⁵⁾を大きくする事を考えた。この結果 EGR 効果が増大し、還流ガス量も減少でき EGR システムを小型にする事が可能と思われる。

2. 実験装置及び実験方法

2-1 供試機関及び燃焼解析方法

使用した機関は、予燃焼室式ディーゼル機関でその主要諸元は表-1 に示す。

燃焼圧測定用指圧計は予燃焼室、主燃焼室ともに燃焼室壁面より 3φ の通路で 18 mm 離れた位置についており、このパイプ系の固有振動数は 3 kHz で、圧力上昇率が高い場合に燃焼波形に影響が出るようである。しかし、着火おくれや熱発生率の傾向を知る上で影響は少ないと考えている。

一方、燃焼圧はクランク角 1° 刻みで圧力を波高分析計に入力し、圧力上昇率、熱発生率の計算に使っている。この波高分析計は、圧力軸の分解能が 8 ビットで、圧力にして最大 0.25 kg/cm² の誤差を生ずる可能性がある。この誤差は主燃焼室と予燃焼室間のガスの移動量に影響を与えるため、較正には注意を払った。また、熱発生率計算開始時の予燃焼室及び主燃焼室のガス重量は、残留ガス温度等を考慮し、圧縮の早期から計算で求めなければならないが、今回は圧縮中期の主燃焼室と予燃焼室に圧力差がみられないクランク角度で、両室の温度、ガス組成を同一と仮定し、容積比より両室のガス重量を求め初期条件とした。このようにして求めた熱発生率は、圧力取出系の気柱振動で圧力が変動すると、計算結果にも影響が現れ比較しやすく、平滑化した曲線で示した。

表-1 エンジン諸元

Table 1. Engine Spec

| | | | |
|----------|----------------|-------|--------------------------|
| エンジン型式 | 水冷, 4 サイクル | 定格出力 | 6 ps/1400 rpm |
| ボア×ストローク | 95 φ×115 mm | 噴射系 | |
| 行程容積 | 815 cc | 噴射ポンプ | ボッシュ (NPE 1A 70 B) |
| 燃焼室 | | ノズル | ピントルノズル (NPDN 4SNP 3) |
| 予燃焼室容積 | 17.8 cc | 噴射圧 | 120 kg/cm ² |
| 主燃焼室容積 | 28.3 cc | 圧縮比 | 18.7 |
| 噴孔径 | 5φ, 2×3.5φ, 1φ | | |

2-2 排気ガス、騒音測定法

NO は NDIR, 炭火水素は FID を使用した。また、シリンダ内のガス定数を求めるため、EGR 時の吸気 CO₂ 濃度をいわゆる電気式 CO₂ 計で測定している。なお、FID はサンプリン

グラインを加熱していないため傾向を知るにとどめる。

また、騒音評価は簡易騒音計のマイクをシリダヘッド上方 30 cm に置き、A スケール音を測定した。

2-3 EGR 率及び吸気絞り率の定義

(1) 標準 EGR 時の EGR 率及び吸気絞り率

EGR 率は通常の定義のように、シリンダ吸入ガス中の還流ガス量で示しているが、還流ガス量は実測していず、吸入空気量測定用の丸型ノズルの差圧より次のようにして求めた。図-1 に示す配管で、標準運転時のマンメータ差圧 h_0 を求め、次に EGR バルブ B の開度をコントロールし、その時のマンメータ差圧 h_1 より次の式で算出する。

$$\text{EGR 率} = \left(1 - \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}\right) \times 100 (\%) \tag{1}$$

絞り率は吸入空気量の減少割合で定義しており、バルブ A を絞って吸入空気量を減少させるが、この時のマンメータ差圧 h_2 がわかれば、(1) の h_1 を h_2 に置き換えて絞り率が求まる。

(2) 吸気絞り時の EGR 率

吸気絞り時の EGR 率は、吸気を絞った状態でのシリンダ吸入ガス中の還流ガス量で定義したが、標準 EGR 同様に還流ガス量を実測せずノズル差圧、吸気管内負圧を利用し次のようにして求めた。まず、EGR をしない状態で図-1 の A バルブを絞り、マンメータ差圧 h_2 及び吸気管内負圧 (水銀柱) H を知る。次に B バルブを開き EGR を行うが、ここで水銀柱 H が変化しないようにバルブ A を調整する。この状態でシリンダ吸入ガス量は一定と考えられるから、この時のマンメータ差圧 h_3 より次式で計算できる。

$$\text{吸気絞り時の EGR 率} = \left(1 - \sqrt{\frac{h_3}{h_2}}\right) \times 100 (\%) \tag{2}$$

この方法は、還流ガス温度が高い時とか吸気管内の脈動波の影響が大きい場合誤差を生ずる。しかし、還流ガスは冷却器を通過しており温度の変化が小さく、また B バルブは EGR 時も絞られており大きな誤差とはならない。

3. 実験結果と考察

3-1 噴射時期と吸気絞り EGR の関係

ノズルリフトより求めた動的噴射時期をもとに、EGR、吸気絞り、吸気絞り EGR 時の噴

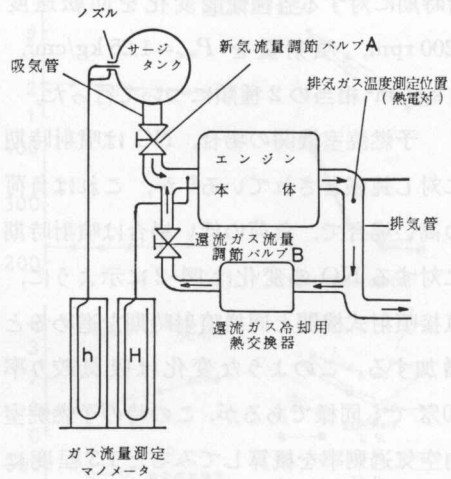


図-1 EGR 配管

Fig. 1. Piping of EGR.

射時期に対する各種性能変化を回転速度 1200 rpm, 噴射量を $P_{me}=1.25 \text{ kg/cm}^2$, 4 kg/cm^2 相当の 2 種類について行った。

予燃焼室機関の場合, NO は噴射時期に対し鈍感とされている²⁾が, これは負荷の高い場合で, 負荷の低い場合は噴射時期に対する NO の変化は図-2 に示ように, 直接噴射式機関と同様噴射時期を進めると増加する。このような変化は吸気絞り率 30% でも同様であるが, この時の予燃焼室内空気過剰率を概算してみると 1.3 程度になっており, 空気過剰率がある値より大きい時運転条件にかかわらずこのような傾向を示すようだ。

一方, 噴射時期とスモークの関係は図-2 に示すように, 軽負荷時は噴射時期に対し変化が少ないが, 負荷が高くなると噴射時期が進むにつれスモークが悪化する。このような軽負荷時のスモーク変化の中で, 標準運転と標準 EGR 時の噴射時期 10° (B.T.D.C) 付近にスモークの悪化が見られる。この傾向は吸気絞り時に現われない事から, 主燃焼室から予燃焼室に流入するガスの運動エネルギーと噴射時期の相互作用に影響しているようだ。一方, 負荷が高い場合は標準運転条件でも予燃焼室内の空気過剰率は約 1.1 とスモークが発生しやすい条件となっており, 吸気絞りや吸気絞り EGR でその傾向は一段と強くなる。このような状態で噴射時期を進めると圧縮圧の低い所への噴射となり, 下部に達する燃料が多くなる事と着火時の予燃焼室内空気量が減少する事から, 過濃混合気ができ予燃焼室内で多量のスモークが発生する。ここで発生したスモークは, 主燃焼室で完全に燃焼する事なく放出されると考えられる。

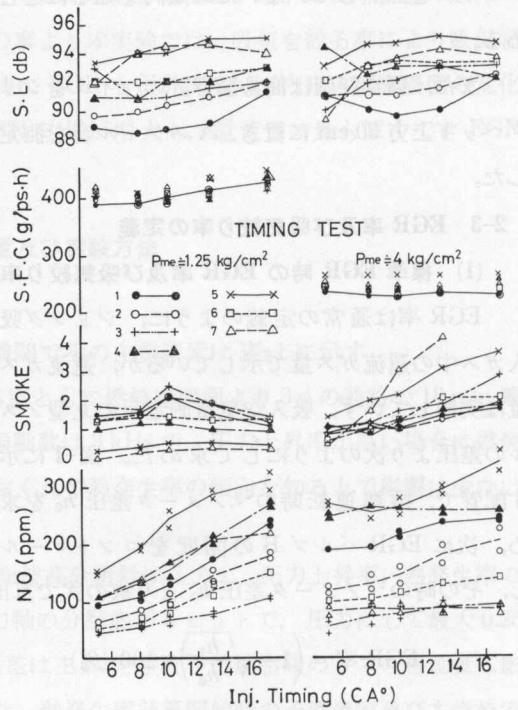


図-2 噴射タイミングの影響

Fig. 2. Effects of injection timing.

- テストナンバー
- 1 標準仕様
 - 2 EGR 10%
 - 3 EGR 30%
 - 4 絞り 10%
 - 5 絞り 30%
 - 6 絞り 10% EGR 10%
 - 7 絞り 10% EGR 20%

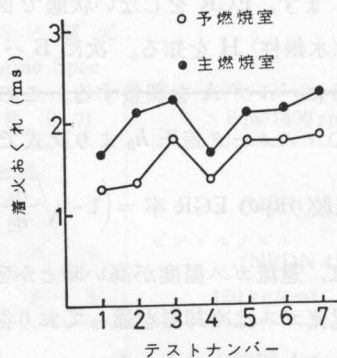


図-3 運転条件と着火おくれの関係

Fig. 3. Relations between running conditions and ignition delay.

ここで発生したスモークは, 主燃焼室で完全に燃焼する事なく放出されると考えられる。

なお、吸気絞りや吸気絞り EGR の燃焼圧より着火おくれを測定してみると 図-3 のようになっており、燃費率に対する最適噴射時期に変化が見られると思ったが、図-2 に示すようにほとんど変化がなく、以後の試験は噴射時期 11° (B.T.D.C) 一定で行った。

3-2 標準 EGR の諸特性

ディーゼル機関の EGR に関する研究は、直接噴射式ディーゼル機関の場合、燃焼圧との関係も明らかになっている⁶⁾が、予燃焼室式ディーゼル機関では十分研究がなされていない。また、今回行った吸気絞り EGR との比較もあり、NO、スモーク、燃焼圧等の変化を調べた。

一般に EGR による NO 低減効果は濃度低下で示されているが、排気ガス重量も減少するから重量変化で比較した方が良く、次のような方法を使った。例えば 図-4 の負荷 4 kg/cm² で EGR 率 30% の NO 測定値は

75 ppm であるが、EGR により排気ガス量は約 30% 減少しており、測定値に 0.7 をかけた値

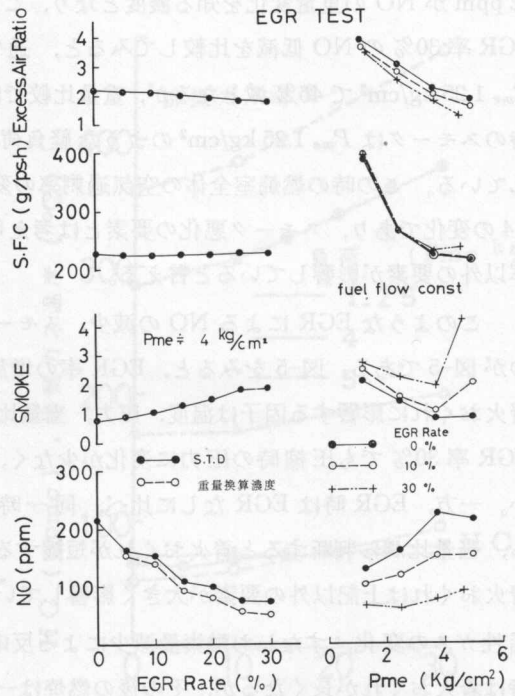


図-4 標準 EGR の排気ガスと燃費

Fig. 4. Exhaust gas and fuel consumption of standard EGR.

75 ppm であるが、EGR により排気ガス量は約 30% 減少しており、測定値に 0.7 をかけた値

EFFECT OF EGR (LOAD Pme 4 kg/cm²)

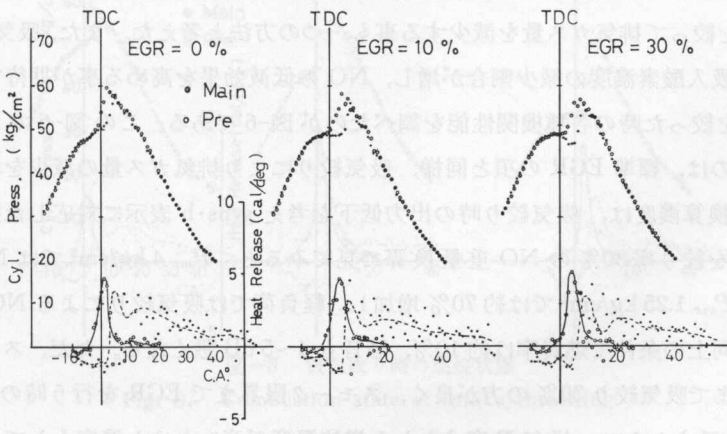


図-5 標準 EGR 時の燃焼状態

Fig. 5. Combustion state of standard EGR.

52 ppm が NO の重量変化を知る濃度となり、これを重量換算濃度とした。このような方法で EGR 率 30% の NO 低減を比較してみると、通常の濃度比較では P_{me} 4 kg/cm² で 66% 減、 P_{me} 1.25 kg/cm² で 46% 減となるが、重量比較では各々 76%、62% の減少となる。一方、EGR 時のスモークは P_{me} 1.25 kg/cm² のような軽負荷時でも EGR 30% でポッシュ値が 1 程度悪化している。この時の燃焼室全体の空気過剰率の変化を酸素濃度をもとに計算すると、3.9 から 3.4 の変化であり、スモーク悪化の要素とは考えられず、EGR 時のスモークの悪化は空気過剰率以外の要素が影響していると言える。

このような EGR による NO の減少、スモークの悪化と燃焼圧、熱発生率の関係を調べたのが図-5 である、図-5 をみると、EGR 率の増加につれ着火おくれが長くなっている。通常、着火おくれに影響する因子は温度、圧力、当量比と言われている⁷⁾が、図-5 でもわかるように EGR 率 30% でも圧縮時の圧力に変化が少なく、温度も吸気温度が変らなければ変化は少ない。一方、EGR 時は EGR なしに比べ、同一時間における予燃焼室内の空気過剰率は低いから、当量比から判断すると着火おくれが短縮する傾向を持つ。これらの条件から、EGR 時の着火おくれは上記以外の要素が大きく影響している事がわかる。この要素としてシリンダ内不活性ガスの変化、すなわち酸素量減少による反応確率の低下と考えている。このように EGR 時は着火おくれが長くなるが、その後の燃焼は一般に言われているような急激燃焼の変化とはならず、図-5 の予燃焼室の熱発生率は着火おくれ期間だけ平行移動する。この結果、EGR 率の増加と共に予燃焼室の燃焼は膨張行程に移行し、最高圧及び最高温度が低下し NO の減少となる。一方、酸素量の減少、燃焼温度の低下でスモークの再燃焼割合は減少し、スモークが悪化するものと考えられる。

3-3 吸気絞り時の諸特性

ディーゼル機関で吸気を絞る事は、ポンピングロスの増加や空気過剰率の低下で性能の悪化が考えられるが、軽負荷条件では必要以上に空気過剰の状態にあり、NO の重量低減を考えた場合、吸気を絞って排気ガス量を減少する事も一つの方法と考えた。また、吸気絞りに EGR を組合せれば吸入酸素濃度の減少割合が増し、NO の低減効果を高める事が期待できる。そこでまず、吸気を絞った時の各種機関性能を調べたのが図-6 である。この図-6 で NO の重量換算濃度とあるのは、標準 EGR の項と同様、吸気絞りにより排気ガス量の減少を考慮した場合で、重量出力換算濃度は、吸気絞り時の出力低下を考え g/ps・h 表示に対応した換算濃度を示す。この結果を絞り率 30% の NO 重量換算で見ると、 P_{me} 4 kg/cm² では NO が約 10% 減少するが、 P_{me} 1.25 kg/cm² では約 70% 増加し、軽負荷では吸気絞りによる NO 低減効果はない。また、同上の条件で燃費率は約 10%、騒音も 4~5 dB 悪くなる。ただ、スモークは P_{me} 2.5 kg/cm² 位まで吸気絞り 30% の方が良く、スモーク限界まで EGR を行う時の利点となる。HC は図-7 に示すように、排気温度すなわち燃焼温度が高いためか濃度として大きな変化がなく、排気ガス量の減少で重量比較をすると低下する要素をもっている。

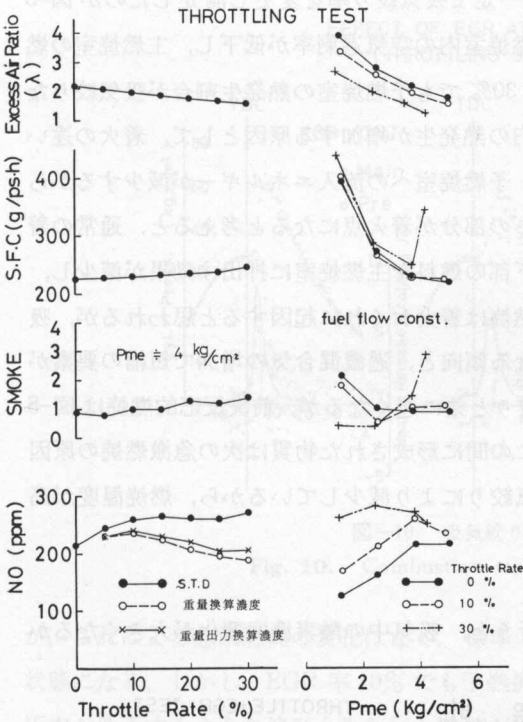


図-6 吸気絞り時の排気ガスと燃費

Fig. 6. Exhaust gas and fuel consumption of intake throttling.

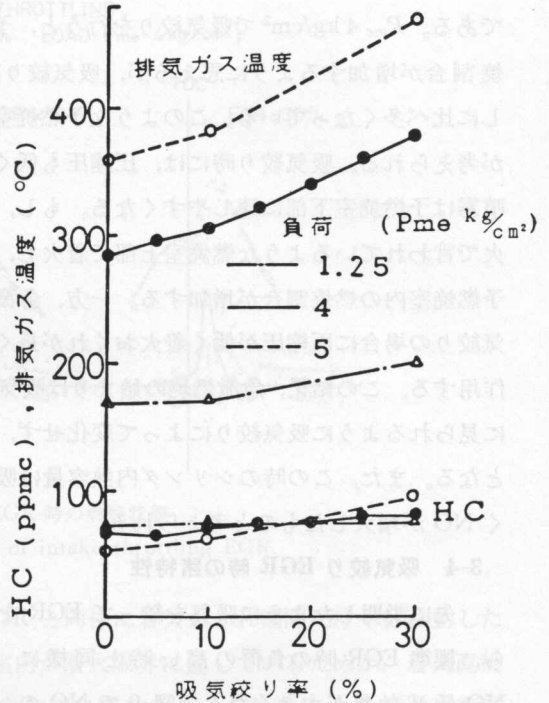


図-7 吸気絞り時の HC 変化

Fig. 7. HC change at intake throttling.

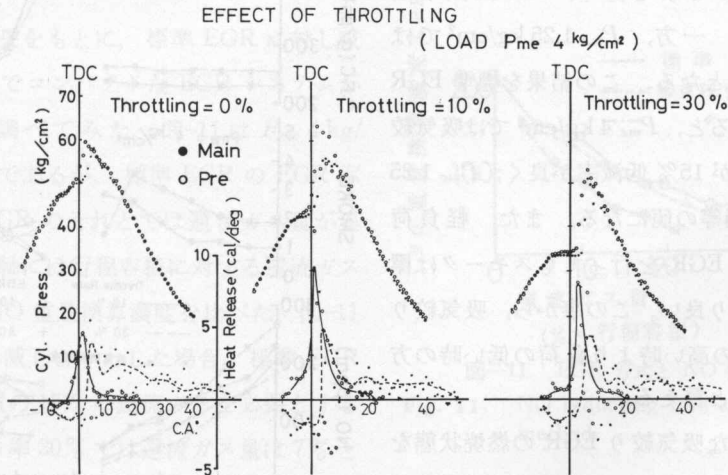


図-8 吸気絞り時の燃焼状態

Fig. 8. Combustion state of intake throttling.

このような吸気絞り時の燃焼圧を燃料流量一定で吸気絞り率を変更し測定したのが図-8である。 P_{me} 4 kg/cm²で吸気絞りを行うと、予燃焼室内の空気過剰率が低下し、主燃焼室の燃焼割合が増加するように思えるが、吸気絞り率30%でも予燃焼室の熱発生割合が吸気絞りなしに比べ多くなっている。このような予燃焼室内の熱発生が増加する原因として、着火の違いが考えられる。吸気絞り時には、圧縮圧も低く、予燃焼室への流入エネルギーが減少するから噴霧は予燃焼室下部に達しやすくなる。もし、この部分が着火点になると考えると、通常の着火で言われているような燃焼室上部で着火し、下部の燃料を主燃焼室に押出す効果が減少し、予燃焼室内の燃焼割合が増加する。一方、急激燃焼は着火おくれに起因すると思われるが、吸気絞りの場合に圧縮圧が低く着火おくれが長くなる傾向と、過濃混合気の増加で短縮の要素が作用する。この結果、急激燃焼の始まりは吸気絞りと共に遅くなるが、前炎反応的燃焼は図-8に見られるように吸気絞りによって変化せず、この間に形成された物質は次の急激燃焼の原因となる。また、この時のシリンダ内熱容量は吸気絞りにより減少しているから、燃焼温度が高くNOが増大したものと考えられる。

3-4 吸気絞り EGR 時の諸特性

先に説明したように吸気を絞って EGR を行うと、吸気中の酸素濃度変化が大きくなるから、標準 EGR 時の負荷の高い時と同様に NO 低減効果が大きくなる。図-9 で NO の重量低減率を吸気絞り率 30% EGR 率 30% で見てみると、 P_{me} 4 kg/cm²では排気ガス量が50%減少する事もあり、NO 低減率は90%になる。一方、 P_{me} 1.25 kg/cm²では62%の低減率となる。この結果を標準 EGR と比較してみると、 P_{me} 4 kg/cm²では吸気絞りの EGR 方が15%低減率が良く、 P_{me} 1.25 kg/cm²では同等の値になる。また、軽負荷時は吸気絞り EGR を行ってもスモークは標準運転状態より良い。この事から、吸気絞り EGR は負荷の高い時より負荷の低い時の方が有効であると言える。

このような吸気絞り EGR の燃焼状態を P_{me} 4 kg/cm², 吸気絞り率 30% で EGR 率を変更し測定したのが図-10 である。図-3 にも示したように、吸気絞り EGR 時も標準 EGR と同様に着火おくれが長くなっている

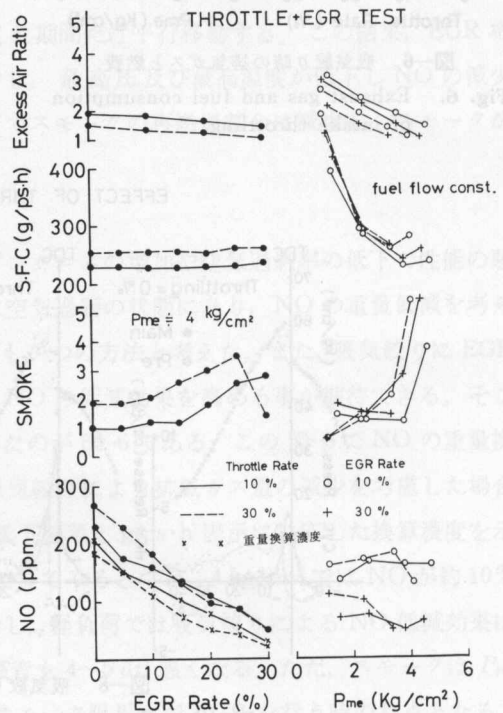


図-9 吸気絞り EGR の排気ガスと燃費
Fig. 9. Exhaust gas and fuel consumption of intake throttling EGR.

EFFECT OF EGR AT THROTTLING
(THROTTLING 30% LOAD P_{me} 4 kg/cm²)

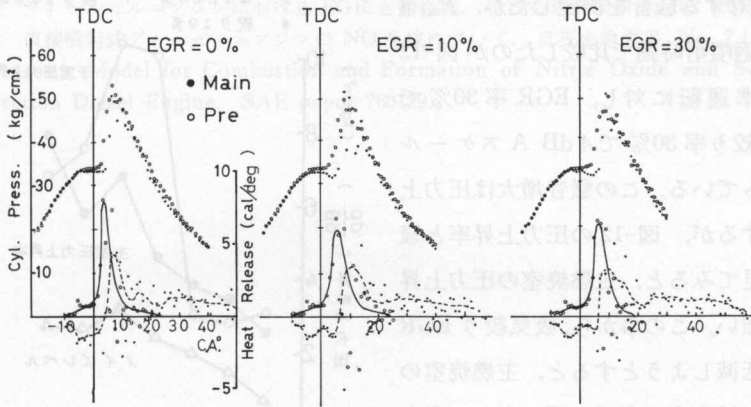


図-10 吸気絞り EGR 時の燃焼状態

Fig. 10. Combustion state of intake throttling EGR.

が、これによる急激燃焼の変化はなく、標準 EGR と同様に着火おくれ期間だけ平行移動した状態になる。しかし、EGR 率 10% でも予燃焼室内が着火限界に達しているためか、着火直後圧力が低下するような波形もみられ、燃焼が不安定である。このような不完全燃焼の影響が図-9の吸気絞り率 30%、EGR 率 30% のスモークの低下となって現われており、この状態は黒煙に代って低温スモークが発生している可能性がある。

以上の結果をもとに、標準 EGR に対し吸気絞り EGR でコンパクトな EGR システムが可能かどうか調べてみた。図-11 は P_{me} 4 kg/cm² での比較であるが、標準 EGR の EGR 率と吸気絞り EGR のそれとでは還流ガス量が異なるから、X 軸には行程容積に対する還流ガス割合を使い、NO 重量換算濃度を比べた。図-11 より NO を半減しようとした場合、標準 EGR では行程容積の 15% の還流ガスを必要とするが、吸気絞り率 30% では還流ガス量は 7% と半減できる。

一方、吸気絞り率 30% の吸気管内負圧は 160 mmHg で、標準 EGR は 10 mmHg 程度であるから、同一流量を考えると流速は約 4 倍となり、EGR 配管径は 1/2 にする事ができる。結局、還流ガス量の減少を考えると、吸気絞り EGR は標準 EGR の 1/3 の EGR 配管ですみ、ガソリン機関で実用化されているような小型の EGR システムが可能となる。

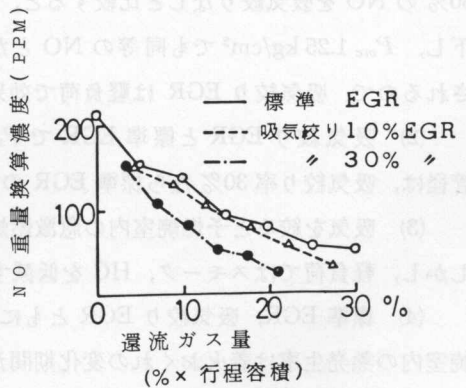


図-11 EGR 方式と NO 低減率

Fig. 11. NO reducing rate against EGR method.

3-5 各種運転時の騒音比較

図-2で噴射時期を変化させた時の各種運転条件に対する騒音を測定したが、 P_{me} 4 kg/cm²の最適噴射時期で比較したのが図-12である。標準運転に対し、EGR率30%で2dB、吸気絞り率30%で4dB Aスケール音が高くなっている。この騒音増大は圧力上昇率に関係するが、図-12の圧力上昇率と騒音の変化を見てみると、主燃焼室の圧力上昇率の影響が強い。この事から、吸気絞りEGR時の騒音を低減しようとする、主燃焼室の圧力上昇率を低くする事が必要であり、現在この低減方法を研究している。

4. ま と め

以上、EGRシステムの小型化を考えた

吸気絞りEGRシステムについて一連の実験を行ったが、結果を要約すると次のようになる。

(1) 絞りEGRは排気ガス量の減少でNO低減効果が大きく、EGR率30%で吸気絞り率30%のNOを吸気絞りなしと比較すると、 P_{me} 4 kg/cm²では吸気絞り率30%の方が15%低下し、 P_{me} 1.25 kg/cm²でも同等のNOとなる。しかも P_{me} 1.25 kg/cm²ではスモークが改善されるので、吸気絞りEGRは軽負荷で効果的である。

(2) 吸気絞りEGRと標準EGRで P_{me} 4 kg/cm²のNOを半減するのに必要なEGR配管径は、吸気絞り率30%なら標準EGRの1/3にする事が可能である。

(3) 吸気を絞ると予燃焼室内の急激燃焼が増大しNOが高く、騒音、燃費率も悪化する。しかし、軽負荷ではスモーク、HCを低減する事ができる。

(4) 標準EGR、吸気絞りEGRともに、EGR率の増加で着火おくれが長くなるが、予燃焼室内の熱発生率は着火おくれの変化期間だけ膨張行程に移行する。この結果、燃焼温度も低下しNOが減少する。

(5) 軽負荷時のNOは、吸気絞りEGRでも空気過剰率が高ければ、直接噴射式機関と同様に噴射時期を進めると増加する。

文 献

1) Naein A. Henein: The Diesel as an Alternative Automobile Engine. SAE paper 750931.
 2) 田代他: ディーゼルエンジン車の排気対策. 自動車技術, Vol. 29, No. 8 (1975).
 3) R. Bertodo: Evolution of a New Combustion System for Diesel Emission Control. SAE

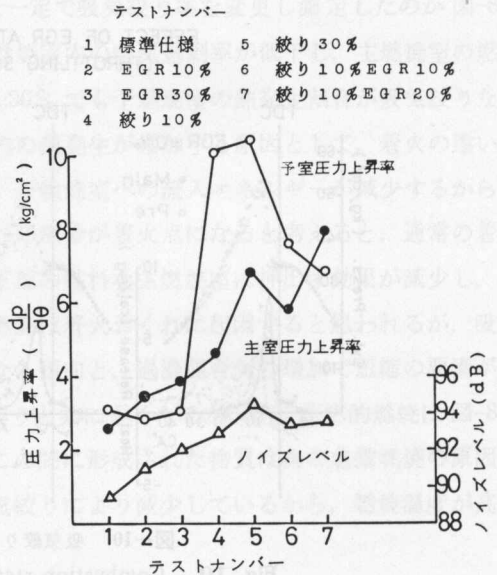


図-12 運転条件と圧力上昇率及び騒音の変化

Fig. 12. Changes of pressure rising rate and S.P.L against running conditions.

paper 741131.

- 4) A. Ecomard: A New Diesel Combustion Chamber the Variable Throat Chamber. SAE paper 730167.
- 5) 常本他: ディーゼルエンジンにおける EGR と諸性能. 自技会講演前刷集, 752 (1975).
- 6) 斎藤他: 直接噴射式ディーゼルエンジンの NO 生成について. 自技会論文集, No. 7 (1974).
- 7) H. Hiroyasu: Model for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engine. SAE paper 760129.

Directional Spectral Emittance of the Coating Film on a Flat Metal Substrate

by HIROSHI HADA and KIMIO KAKAYAMA

An investigation on the emissive property of the coating film-metal substrate system with attention to the thermal radiation inside the medium, is performed to derive an equation of the directional spectral emittance in connection with optical constants of the coating film, its thickness, and then the analytical solution is compared with the measured value of a coated surface on aluminum plate. In the range $0 < \tau < 0.1$, the emissive property of the coating film on a metal can be considered as a function of dimensional thickness τ . When $\tau \geq 0.25$, the emittance of a coating film on the metal is almost equal with that of the calculated value from Fresnel's formula, and for $\tau < 0.25$, the error decreases by an influence of the emissive property of metallic substrate with increasing τ . In the wavelength region from 3 to 8 microns, the calculated values are in good agreement with the measured values of surfaces with silicon-orange paint and acrylic-resin.

1. ま え が き

近年金属基板上の金属酸化物の誘電体薄膜または絶縁膜からなる系における反射率、吸収率及び透過率など多くの熱ふくむ性質が、それらの光学定数、塗膜厚さ、金属基板上の放射特性に関連して研究されている。たとえば Francis and Love¹⁾ は屈折率の影響を測定し、誘電体中への金属からの指向単色光の反射率及び金属表面の誘電体の指向単色光の反射率について報告している。Ruz-Urbieta²⁾ は種々の入射角における単色反射率の測定から、金属基板上の薄い透明膜及び吸収膜の光学定数及び膜厚を決定する方法を開発し、実験を二、三の測定値と比較した。Williams³⁾ は、もし半導体の膜が高い空層率を有すれば、その光学的性質は改良され得ることを理論的に研究し、空層選択性が特殊な PBS 膜によって実験的に得られ、それは太陽光線の吸収に有益であることを示した。

1) AIAA 流体力学誌, Vol. 7, No. 7, 1975-81. 及び第 13 回日本放射熱工学シンポジウム (昭和 50 年 5 月 10 日) で発表

2) 流体力学誌

3) 流体力学誌