

## 直接噴射式ディーゼルの青白煙について\*

—各種EGR方式の効果—

常本秀幸\*\*

石谷博美\*\*

(昭和55年4月11日受理)

### A Study of the Cold Smoke from a Direct Injection Diesel Engine

—The Effect of EGR Methods—

by Hideyuki TSUNEMOTO and Hiromi ISHITANI

One method of improving the cold starting characteristics in a direct injection diesel engine, is that named TSCE (Two Stage Combustion EGR). It prevents the induction of a fresh air to half the cylinders of the engine, instead of it using the exhaust gas from the already operating cylinders. This quickens the rise in intake gas temperature of the second stage cylinders, shortens the starting time, and causes a stable combustion at the earliest possible time.

As a result, Hydrocarbon mass emission and Aldehyde concentration, the main components exhaust pollution, were reduced to 1/3 of the amount produced by the usual method of operation, when air, oil and water temperatures  $-10$  to  $-12^{\circ}\text{C}$ .

#### 1. ま え が き

ディーゼル機関における低温時の始動性確保、および青白煙の低減は、乗用車、あるいは小型トラックなどへのディーゼル機関の普及につれて、今後研究を促進しなければならない重要課題の一つである。

従来これらの問題に関しては、補助装置によるものの外に、燃焼室や噴射系の改良などに関する研究が行なわれて来たが、今回提案するTSCE (Two Stage Combustion EGR) と名付けた方法は、機関の半数の気筒の新気吸入を停止し、これらの気筒に対して、それ以外の気筒、すなわち正常な吸気を行なう気筒からの排気ガスを吸入させることによって、低温始動性の改善、ならびに低温スモークの低減を目的とするものである。

本研究においては、4気筒機関の2番および4番気筒を改造して、TSCE方式の実施を試

\* 日本機械学会、自動車技術会内燃機関合同シンポジウムで講演 (1979-8-2, 3, 東京)

\*\* 北見工業大学応用機械工学科

み、これと標準装備の機関、および EGR 付機関、あるいは排気絞り方式などとの比較を行なった結果、始動性、および低温スモーク中の未燃炭化水素の減少傾向、さらには排気臭などに関しては、この TSCE 方式が最も効果的である事が確認された。以下、得られた結果について詳述する。

表 1 供試機関の諸元

Number of cylinder	4
Bore×Stroke	102×110 mm
Swept volume	3.6 l
Compression ratio	17.5
Injection pressure	185 kg/cm <sup>2</sup>
Nozzle hole number and diameter	4×0.32 mm

## 2. 実験装置および方法

表 1 に供試機関の諸元を、図 1 に実験装置の概略をそれぞれ示す。実験に際しては、4 番気筒に対して、歪計式指圧計を装着して筒内圧力の測定を行ない、これを、クランク角、および噴射時期とともにレコーダーに収録し、熱発生率などの解析に使用した。なお噴射時期は、電磁型の変位計を噴射弁ニードルに取付けて測定し、クランク角は、スリット円板およびフォトランジスタにより 1°C A 毎に検出した。また、各部の温度測定は、素線径 0.32 φ のクロメル-アルメル熱電対を用いて行なった。

低温スモークの測定には、PHS 型スモークメーターを使用し、20°C 前後の空気を流して、フィルターなどにおける結露の防止を図った。一方、排ガス中の未燃炭化水素を、排気弁より約 3 m 下流の部分で採取して、水素炎イオン化検出器 (FIA) により分析した。また、排気臭の比較には、炭化水素と同一の測定点を使用し、臭気の代表物質として脂肪族アルデヒドを想定して、MBTH 法<sup>1)</sup>により測定を行ない、ホルムアルデヒド換算値によって指示値を表示した。

低温スモークの測定には、PHS 型スモークメーターを使用し、20°C 前後の空気を流して、フィルターなどにおける結露の防止を図った。一方、排ガス中の未燃炭化水素を、排気弁より約 3 m 下流の部分で採取して、水素炎イオン化検出器 (FIA) により分析した。また、排気臭の比較には、炭化水素と同一の測定点を使用し、臭気の代表物質として脂肪族アルデヒドを想定して、MBTH 法<sup>1)</sup>により測定を行ない、ホルムアルデヒド換算値によって指示値を表示した。

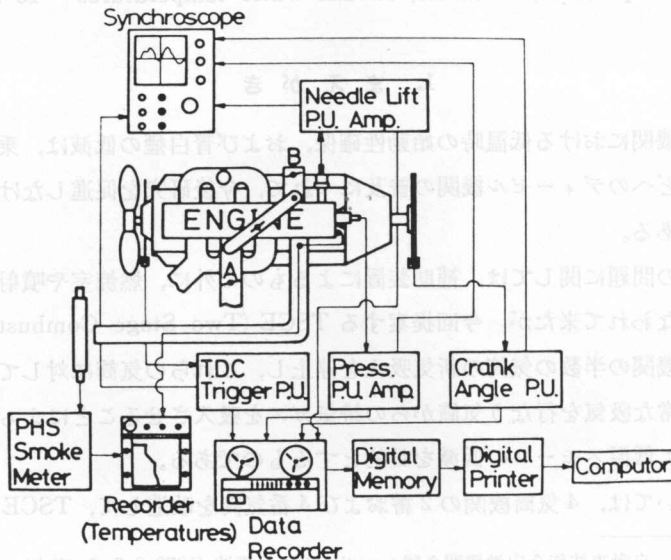


図 1 実験装置の概略図

この方法は、アルデヒドと MBTH 溶液との間の青色反応を利用するものであるが、図 2 に示すように、燃焼が進行してアルデヒド濃度が低下すると見なされる時間帯で、本来の反応による 630 nm の指示値が、高めに表示されるという欠点をともなうので、低濃度域の評価は精度の上で問題を含んでいる。

本報告で提案する TSCE 方式の試験結果は、前述のように、4 気筒のうちの 2 番および 4 番気筒に改造をほどこして得られたものであり、図 1 に示すように、2 番気筒は正常な吸気を行なっているが、その排ガスを、バルブ A を閉じることによって、全量を 4 番気筒に吸気させている。この場合に、4 番気筒の吸気行程においては、2 番気筒の排気ガスだけが吸入されるように、吸気管に装備したバルブ B が閉じた状態での運転が行なわれている。

なお、本実験の場合には、4 番気筒の燃焼状態を変化させることが、TSCE 方式としての機関改造の主体となることから、比較試験として行なった EGR や排気絞り方式に関しても、この気筒のみ改造を加えて実験を行なった。

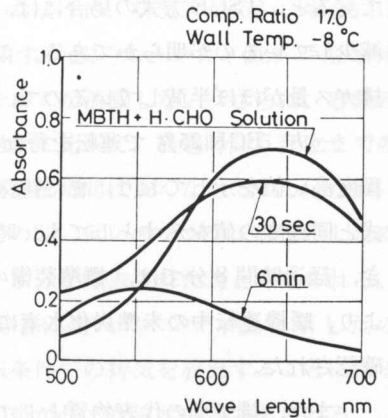


図 2 アルデヒドの吸光特性

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 TSCE 方式の効果

##### 3.1.1 各方式における未燃炭化水素および排気臭の比較

図 3 は、外気温  $-10 \sim -12^{\circ}\text{C}$  の条件において、機関を始動した場合の未燃炭化水素重量 (HC, g/h)、およびアルデヒド濃度の測定結果を示すものである。HC に関しては、運転条件の如何にかかわらず、始動時の不完全燃焼の影響が、始動後 1 分位までの時間経過に対して現われており、各方式における差違を比較するのは困難である。ただし、TSCE 方式の場合には、後で示すように、完爆時間が短い。しかし、2 番および 4 番の 2 気筒分のガスが放出されるため、HC は他の方法における場合と同レベルか、むしろそれよりも高い値を示している。一方、始動後 2 分を経過した時点で比較し

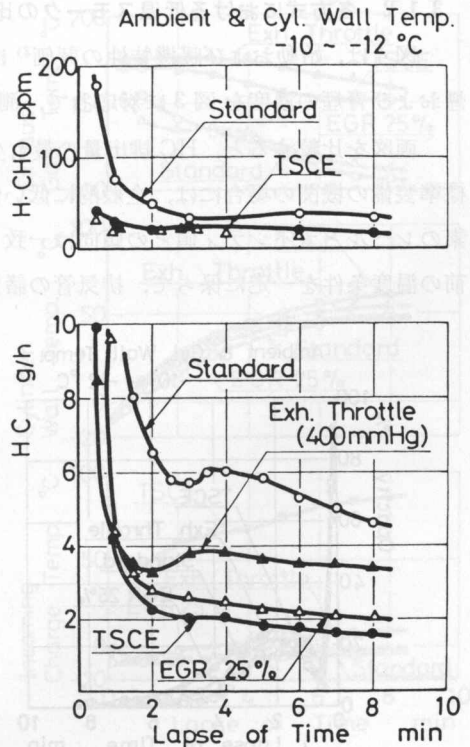


図 3 HC 排出量と排気臭

て見ると、TSCE方式の場合には、標準装備の機関にくらべて、未燃炭化水素重量が約1/3に減少しているのが明らかである。この場合にHC濃度そのものの減少は2/3程度ではあるが、排ガス量がほぼ半減しているので、重量としては約1/3に低減したことになる。

一方、EGR 25%で運転を行なった場合には、HCはTSCE方式と比較して、全般に30%程度高い値を示しており、また排気絞りの場合にも、始動後2分を経過するまでは、TSCE方式と同程度の値を示すとしても、時間の経過とともに、標準装備の機関における排出値に近づき、経過時間8分では、標準装備の機関よりも20%程度低い値を示すにとどまる。このことより、暖機運転中の未燃炭化水素に関しては、TSCE方式が他の方法よりも優れていることが確認された。

また、排気臭の代表物質として測定したアルデヒドは、標準装備機関の場合には、始動30秒後に180 ppmのレベルを示しているが、TSCE方式では、最大50 ppm程度と約1/3に低減している。そして、時間経過につれてその差は減少するが、排出重量を考慮すれば、TSCE方式の効果は、より顕著なものであることが明らかである。なお、EGR装備や、排気絞りを適用した場合についても同様の測定を行なったが、いずれも濃度ではTSCE方式との間に差がないものの、重量ベースで考えると、TSCE方式よりも多量のアルデヒドを排出していることが明らかとなった。

### 3.1.2 各方式における低温スモークの比較

図4は、始動および暖機特性の評価<sup>2)</sup>に際して、PHS型スモークメーターを使用して、白煙および青煙の濃度を図3に対応して、測定した結果を示すものである。

両図を比較すると、HC排出量の最も少ないTSCE方式が高いオパシティ値を示す一方、標準装備の機関の場合には、一般的に低い値を示すことが認められる。すなわち、未燃炭化水素のレベルとオパシティ値との傾向は一致していない。そこで、この原因を調べる為に、始動前の温度条件を一定に保って、排気管の諸元を変えた時のオパシティ値の変化を調べた。図5

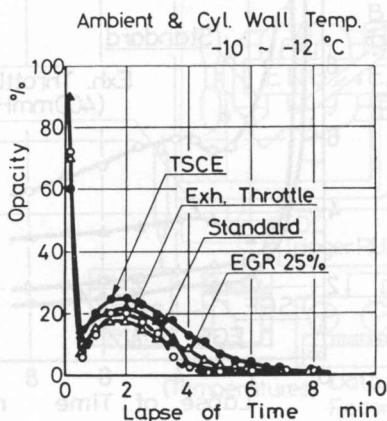


図4 低温スモークの時間変化

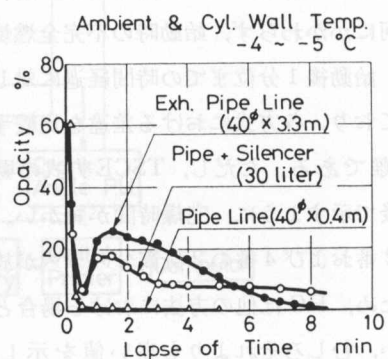


図5 排気系諸元と低温スモーク

は、この一連の実験結果を示すものである。図より明らかなように、排気管が短い場合にはほとんど確認できなかったスモークが、長い排気管を使用すると、オパシティ値が25%まで増加して、しかも始動後の経過時間8分位までの間、スモークが消滅しない。さらに、容量の大きなサイレンサーを装備した場合には、排気管だけの場合に比べて、経過時間5分位までの間は低いオパシティ値を示すものの、低温スモークの発生継続時間は長くなっている。なお、サイレンサーを装備することによって、始動後5分位までの間、低いオパシティ値を示したのは、サイレンサー容積部において排ガスの冷却がなされ、水分が除去された為と考えられる。

このようなことから、図4において、TSCE方式の場合に高いオパシティ値を示したのは、標準装備の機関に対して、空気過剰率が半減した運転条件での排気を放出することになるために、水蒸気濃度が増加し、飽和条件に保持される時間帯が長くなった為と考えられる。

上述のように、低温スモークをオパシティ値によって比較することは、排気温度、空気過剰率、あるいは排ガス量の変化が小さい場合には妥当であるとしても、今回の試験のような場合には、適当でないことが明らかとなったので、以後の評価は、HC排出量や燃焼状態などを総合して行なうことにする。

### 3.1.3 各部の温度経過

TSCE, EGR, および排気絞り方式のいずれもが、圧縮端温度を高めて、始動性の向上を図ろうとするものである。図6は、この効果を確認する為に測定した、排気温度、ライナー上端壁温、および4番気筒の吸气温度を、それぞれ示したものである。

図において、TSCE方式における吸气温度は、始動直後に高い値を示したあと、経過時間1分で約50°Cまで低下し、その後徐々に上昇して、経過時間8分で約85°Cのレベルに達している。一方、EGR 25%の場合には、還流ガスと低温の新気とが混合するので、同一経過時間において10°C程度の上昇にとどまっている。また、排気絞りの場合には、吸气温度の上昇は無視し得る程度のものであったが、排気を絞って排圧を400 mmHgまで上げると、吸气効率が約5%低下しており、これに対応した残留ガスの増加によって、シリンダー内温度が高くなっているものと考えられる<sup>3)</sup>。

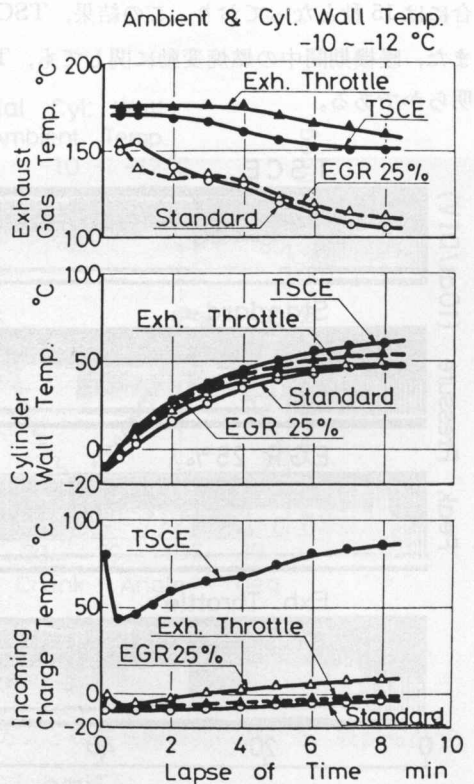


図6 各部の温度経過

図6において、TSCE方式における排気温度は、標準装備の機関に比べると、吸気温度の上昇によってサイクル全体の温度が高くなるので、経過時間全般に25~50°C高い値を示している。また、排気絞りを適用した場合には、絞り弁上流の排気管内で排ガスが圧縮されるので、排気温度が高まり、その結果、残留ガスの温度が上昇することにもなる。なお、排気温度が時間とともに低下するのは、着火おくれの短縮に伴い、燃焼終りの時期が早まることと、暖機の進行による摩擦損失の低減の効果、噴射量が減少すること等が主たる原因と考えられる。

### 3.1.4 暖機中の燃焼状態の変化

図7は、先に示したような機関各部の温度の上昇が、始動性に対していかなる影響を及ぼすかを調べるために、4番気筒の燃焼最高圧力の時間に対する経過状況を比較したものである。

始動試験は、噴射ポンプのラック位置を最大にしてクランキングを行ない、機関回転速度が上昇した時点で、ラックを設定位置にもどす方法により行なった。図に示されるように、燃焼最高圧は、始動後数秒経過した時点では、機関回転数の上昇とともに高い値を示すが、噴射ポンプのラックを設定位置にもどすことによって、一旦低下した後、徐々に上昇して安定した燃焼状態へと移行する。この安定した燃焼に移行する時間を比較してみると、TSCE方式では約10秒、標準装備の機関の場合には30秒、EGR装備で12秒、そして排気絞りを適用した場合には15秒となっており、この結果、TSCE方式の場合に最も良好な結果が得られている。また、暖機期間中の燃焼変動に関しても、TSCE方式の場合に最も優れていることは、図より明らかである。

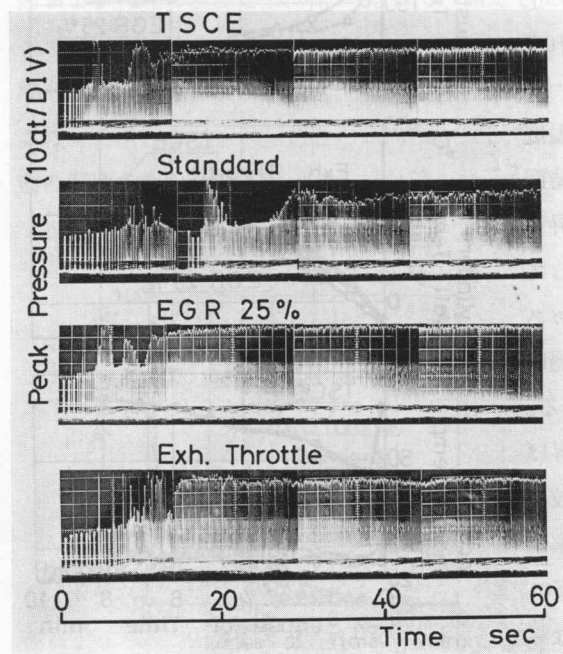


図7 始動直後の燃焼圧力

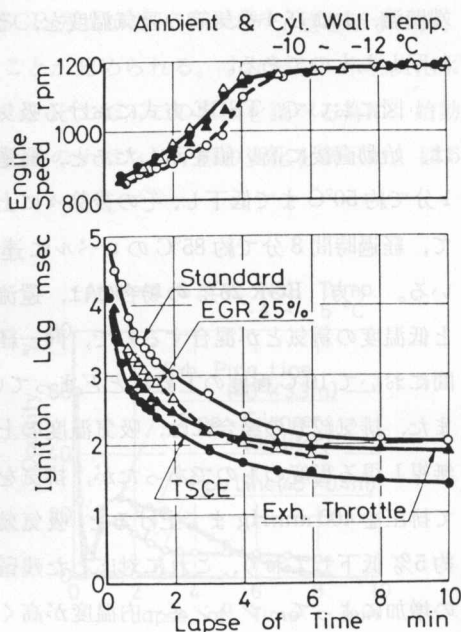


図8 着火おくれ期間の時間経過

一方、図8は、図7に対応する着火おくれ期間の経過時間による変化状況を示すものである。図より明らかなように、TSCE方式を採用した場合の着火おくれ期間は、全暖機期間を通して、他のいかなる装備条件の場合よりも短い。とくに標準装備の機関と比較した場合には、1分を経過した時点で1 m sec、クランク角にして5°の開きがあり、8分を経過した所でも、約0.6 m secの相違が存在する。

また、排気絞りの場合には、始動直後の着火おくれは短いものの、時間経過とともに標準装備機関における値に接近しているが、このような傾向は、図3に示したHC排出量の時間経過と類似しており、着火おくれの短縮が、低温時の排気特性に対して強く影響することを意味している。

図9は、筒内圧の解析結果の一例を示したものである。この場合の熱発生率は、冷却水損失を考慮していないために、全般に低い値を示しているものと考えられるが、いずれの場合にも、燃焼は噴射終了後に始まり、とくに始動後30秒あるいは2分を経過した時点でのインジケータ線図においては、いわゆる拡散燃焼の存在は認められない。着火が比較的早期に起きているTSCE方式の場合にも、この傾向が変わらないことから考えると、着火おくれ期間中に蒸発しなかった燃料、とくに低温の壁面に付着したものは、吸気温度の上昇によってだけでは十分に蒸発し得ないことを示すものであろう。

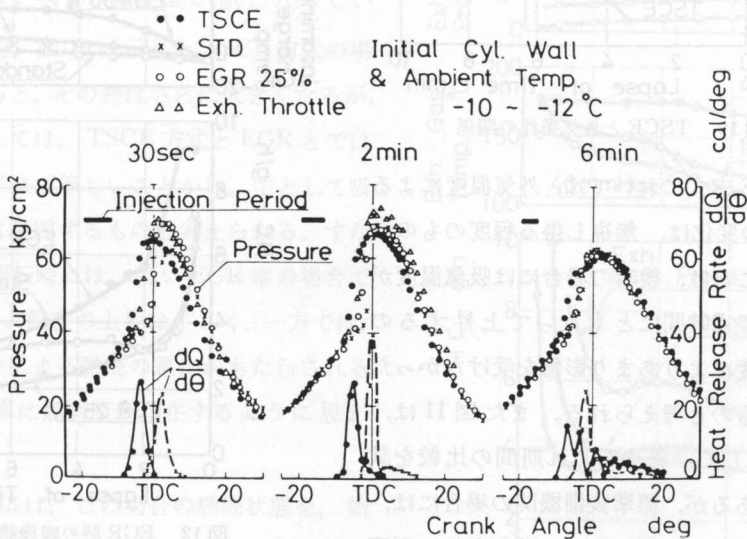


図9 暖機中の燃焼圧力の解析結果

### 3.1.5 TSCE 効果に及ぼす外気温度の影響

図10は、外気条件を変化させた時の、TSCE方式と標準装備機関における、吸排気温度、およびHC排出量を、それぞれ比較した結果を示すものである。

標準装備機関の場合には、外気温度の低下にともなって、HC排出量が大幅に増加してい

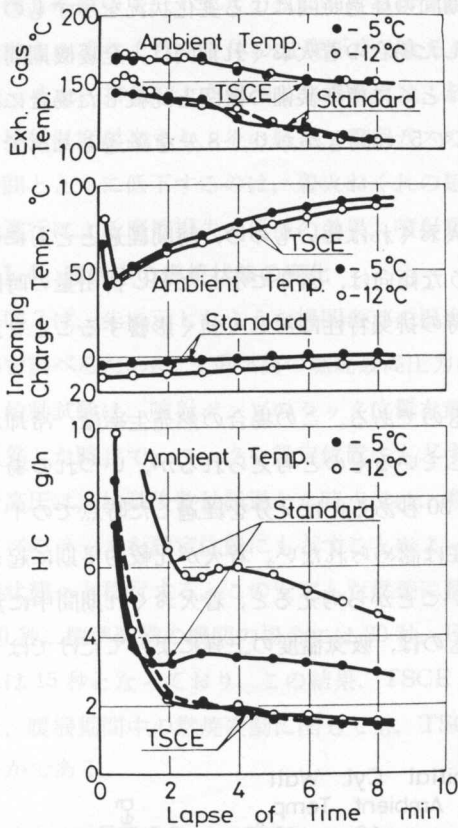


図10 TSCEと外気条件の関係

るが、TSCE方式においては、外気温度によるHC排出量の変化は、無視し得る程度のものである。このことは、後者の場合には吸気温度が高く、また経過時間にもなって上昇するので、外気温度によりあまり影響を受けなかったことによるものと考えられる。また図11は、図10に対応して、着火おくれ期間の比較を試みたものであるが、標準装備機関の場合には、とくに暖機期間の初期において外気条件の影響が大きいのに対して、TSCE方式では、着火おくれ期間の差はほとんどなく、このことから考えると、TSCE方式は、外気温度が低下した場合ほど効果的であると言えよう。

### 3.2 EGR 装備が始動特性に及ぼす効果

図12は、外気温度  $-5^{\circ}\text{C}$  付近でEGR率を変化した場合の、暖機運転期間における吸排気温度、およびHC排出量の時間経過を示すものである。

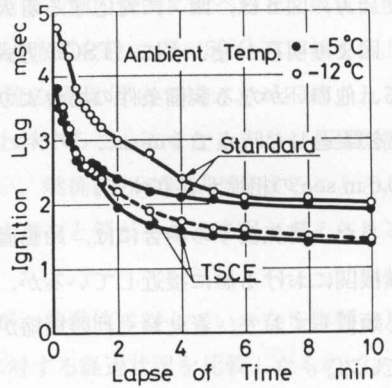


図11 外気条件と着火おくれ

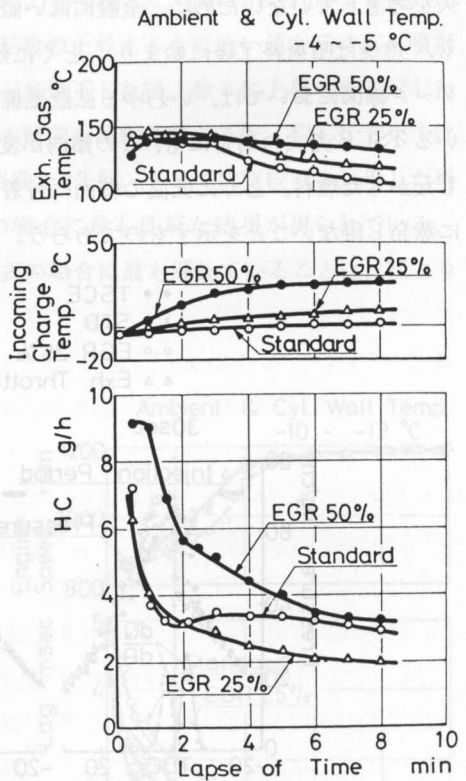


図12 EGR時の暖機諸特性



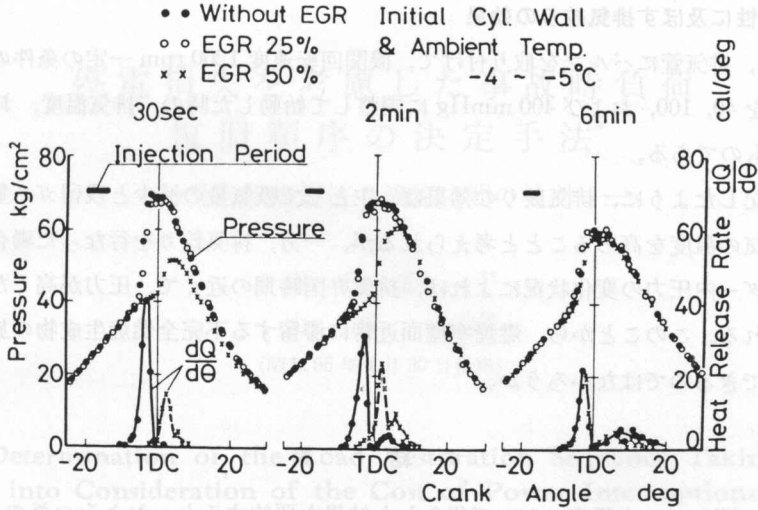


図13 EGR時の燃焼解析

EGR率が50%の場合には、排ガス量が半減しているにもかかわらず、標準装備機関に比べて、始動後4分位までの経過時間において、HC排出量が1~4g/h程度高い値となっている。この値を、図10に示したTSCE方式の場合と比較すると、その差はさらに大きくなるが、その原因としては、TSCE方式とEGRとでは吸入酸素量がほぼ等しいことから、主として吸入温度の差に起因するものと考えられる。すなわち、暖機運転時には、高いEGR率の場合であっても、吸入温度の上昇は小さく、一方では、酸素量の減少による燃焼の悪化もたらされるから、EGR率に最適値が存在するように思われる。

なお図13は、この場合の燃焼状態を、始動後の時間経過に対して比較したものである。EGR25%の場合、始動後30秒あるいは2分経過した時点での燃焼波形では、標準機関との差は明瞭でないものの、EGRを適用した場合

には、排ガス重量変化などが原因となって、HC排出量は減少するものと考えられる。一方、EGR率50%の場合には、図13からも、燃焼が不完全なことが認められる。

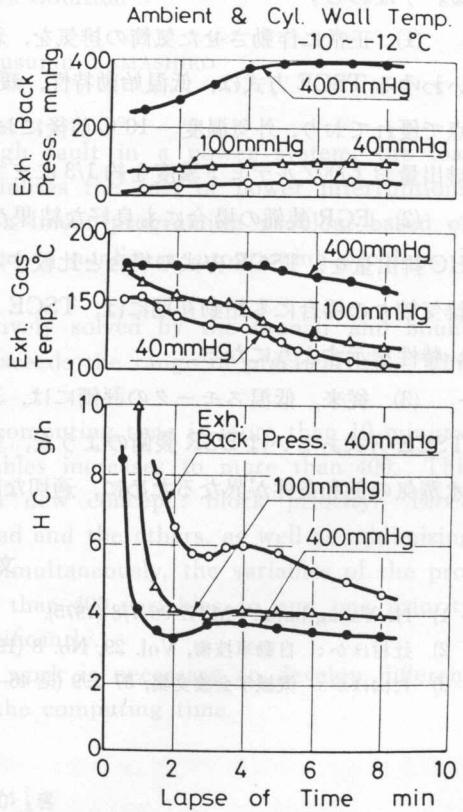


図14 排気絞りと暖機諸特性

### 3.3 暖機特性に及ぼす排気絞りの効果

図 14 は、排気管にバルブを取り付けて、機関回転速度 1200 rpm 一定の条件のもとで、排気管内圧力を 40, 100, および 400 mmHg に調整して始動した時の、排気温度、および HC 排出量を示すものである。

先にも記したように、排気絞りの効果は、主として吸気量の減少と残留ガス量の増加とによって、新気の温度を高めることと考えられるが、一方、排気絞りを行なった場合の排気行程中のシリンダー内圧力の変化状況によれば、排気弁閉時期の近くで、圧力が高くなっていることが確認される。このことから、燃焼室壁面近傍に滞留する不完全燃焼生成物の放出を押える効果も期待できるのではなからうか。

## 4. 結 論

TSCE に関して、本研究において得られた結果を要約すると、およそつぎのとおりである。すなわち；

(1) 正常に作動させた気筒の排気を、新気の吸気を停止させた気筒に対して吸入させる、いわゆる TSCE 方式は、低温始動特性、暖機運転期間の短縮およびその間の燃焼の安定性の点で優れており、外気温度  $-10^{\circ}\text{C}$  前後における試験結果を標準装備の機関と比較すると、HC 排出量およびアルデヒド濃度を約 1/3 にまで低減しうることが明らかになった。

(2) EGR 装備の場合にも良好な結果が得られているが、外気温度  $-10^{\circ}\text{C}$  付近における HC 排出量を、TSCE 方式の場合と比較すると、全般に 30% 程度高い値を示している。また、排気絞りの場合にも始動初期には、TSCE と同程度の値を示すが、時間とともに標準機関に近い特性を示すようになる。

(3) 従来、低温スモークの評価には、透過型のスモークメーターが使用されていたが、TSCE 方式あるいは EGR 装備のような、空気過剰率や排ガス量が大幅に変化する場合には、水蒸気の飽和条件が異なるために、適切な評価が困難であることが明らかとなった。

## 文 献

- 1) H. Yanagihara: MTZ 36-7/8 (1975).
- 2) 辻村ほか: 自動車技術, Vol. 29, No. 8 (1975).
- 3) 村山ほか: 機械学会論文集, 37-299 (昭 46-7).