

# 直接噴射ディーゼルエンジンにおける 低温スモークの研究\*

— 燃焼状態とスモークの関係 —

常本 秀 幸\*\*

石谷 博 美\*\*

(昭和52年4月28日受理)

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

— The Relation between Combustion in the  
Cylinder and Cold Smoke —

by Hideyuki TSUNEMOTO and Hiromi ISHITANI

Though the cold smoke was usually detected by visual sensitivity of man, in this paper it was measured by a light transmission type smoke meter and evaluated numerically.

Using this smoke meter, the relation between combustion in the cylinder and smoke was clarified.

### 1. ま え が き

燃料危機を契機として自動車用エンジンをガソリンからディーゼルエンジンに変更しようとする動きがある。このディーゼルエンジンのうち特に直接噴射式ディーゼルエンジンは燃費が良くその目的にかなっているが、騒音とか冷間時に問題があり予燃焼室式ディーゼルエンジンがその主流となっている。

この直接噴射式ディーゼルエンジン冷間時の問題は、白煙、青煙と言われる低温スモークで、目、鼻、のどを刺激する有害ガス<sup>1)</sup>であり、トンネル内とか寒冷地で特に問題となる。発生原因は低温時の不完全燃焼による燃料の微粒子または燃焼中間生成物の排出によるものと言われており、一般的に圧縮比を高める事や、噴射系の改造、吸気ヒーター等によって発生時間を短縮させている。ここで、低温スモーク発生時のシリンダー内燃焼を解析する事により、他の解決方法を目的として研究を始めているが、今回は黒煙測定用に使われている光透過式スモークメーターを利用し、従来人間の視感度によっていた低温スモークを数値化<sup>2)</sup>すると

\* 日本機械学会第54期学術講演会で発表(52年4月於東京)

\*\* 北見工業大学機械工学科

もに、その時の燃焼状態との関係を調べた。

## 2. 供試エンジンおよびスモークメーター

供試エンジンは表1に示すような市販エンジンであるが、4気筒の燃焼圧が測定できるように改造し、0°C前後での低温スモーク発生を容易にするため圧縮比を低くして使用している。

スモークメーターの構造は図1に示すようになっており、光源はタングステンランプ(24 W)、受光部はセレン光電池でできている。スモークメーターは図2に示すようにサイレンサー後方に取付け、排気管径はPHSの規定に従った。なお図2のその他の番号は温度測定および圧力測定用のP.U位置を示す。

表1 エンジン諸元  
Table 1. Engine spec.

シリンダー数	4	
ボア×ストローク (mm)	102×110	
行程容積 (cc)	3595	
圧縮比	14.5	
噴射ポンプ	DKK	
ガバナー	RAD (機械)	
ノズル	噴射圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	185
	噴口径 (mm)	4×0.32
噴射時期 (B. T. D. C)	22° (静止)	

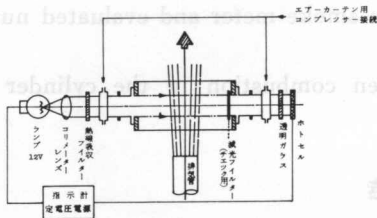


図1 スモークメーターの構造

Fig. 1. Structure of smoke meter

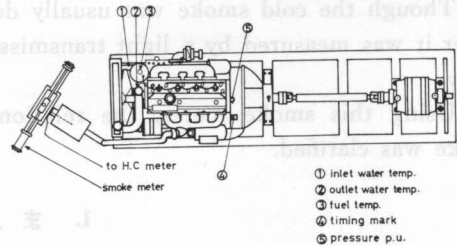


図2 装置略図

Fig. 2. Schematic drawing of equipment

## 3. スモーク測定法

### 3-1 メーター感度

図1に示すスモークメーターは黒煙測定用に作られたものであり、黒煙のように全波長域の光を吸収する物体の場合、メーター指示は透過光の大小を示す事になるが、白煙や青煙のように物体の粒子径の大小による散乱<sup>3)</sup>で色が変化する時は、黒煙と同一濃度でもメーター感度は低下する。特にセレン光電池の感度特性は図3に示すように視感度に近く、青煙の測定に必要な0.4μ付近の感度が一段と悪くなっており、このため実際のエン

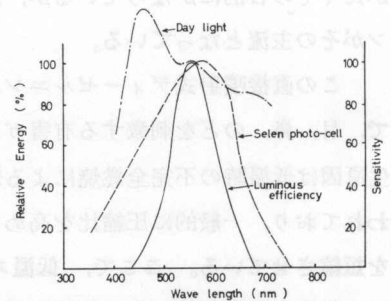


図3 セレン光電池の波長に対する感度特性

Fig. 3. The characteristics of sensitivity of seleno photo-cell with the changing of wave length

ジンでスモークの有無を判断するには、オパシティ1%程度の値を正確に測定できなければならない。そこで光源にフィルターを使い中～長波長域の光をカットし、短波長域の光量変化に対する感度を高める事を考えたが、まだ十分な結果が得られていず、今回の実験結果は市販メーターの状態と比較している。なお、測定に際してはゼロ点変動による誤差を少なくするため始動直後は30秒ごと、2分以降は1分間隔で較正を行った。

### 3-2 外部光源の影響

このような光透過式メーターを使う上で注意すべき事に外部光源の影響がある。実験は室外で行っており、太陽光の影響があればオパシティ1%の精度を確保する上で問題となる。そこで表2は暗室で標準フィルターを使い光透過式スモークメーターの較正を行いその状態で晴天下、日陰、くもり等の条件でメーター指示の変化を調べた結果である。この結果より、晴天下の場合には最大と最小の差が大きく、測定中変動する要素もっているが、日陰では変化が小さく、使用時にその場で較正して使えば外部光源の影響は無視できる。

表2 スモークメーターに対する外部光源の影響

Table 2. The effect of outside light for smoke meter

場 所	オパシティ (%)			
暗室	0	28	49.5	100
室内	-0.25	27.5	49	100
日陰	-1	27	48.5	99
くもり	0	28	49.5	100
晴天 A	—	8	26	65
晴天 B	-2	26.5	48	98

## 4. 実験結果と考察

### 4-1 シリンダー壁温とスモーク

3章で示したスモークメーターを使い初期壁温を変更した時の低温スモークの発生状況の結果が図4である。実験は、無負荷暖機状態でエンジン回転を1,100 rpmに合わせ停止し、試験目標温度に達したなら始動する方法で、初期壁温を2.5°C～29°Cまで5段階に変更した時の各条件における始動後の低温スモーク、回転数、壁温の変化を時間経過に対して測定したものである。この結果、低壁温時ほど低温スモークが多量に発生するが、この原因として考えられるのは、1つに圧縮時のシリンダー内ガス温度が低い事による浮遊燃料粒子の蒸発の悪化であり、もう1つに低温のためシリンダー壁に付着した燃料の蒸発が不活発なためとがある。ここで浮遊粒子の蒸発と壁面付着燃料の低温スモークに対する影響を考えた場合、燃焼温度は初期温度が低くても蒸発に十分なだけの温度に達するから、浮遊粒子は気体の形になっていると考えられる。しかし、始動

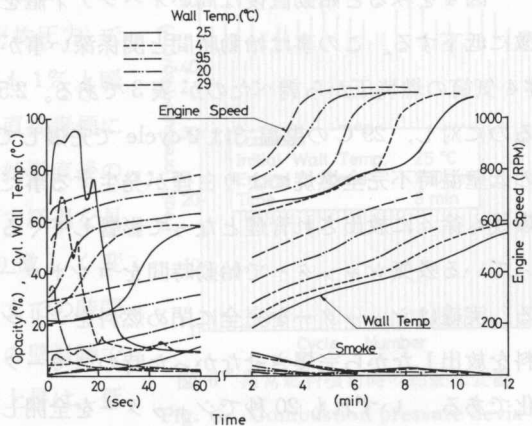


図4 初期壁温変化時の低温スモークと壁温の関係

Fig. 4. The relation between cold smoke and cylinder wall temp. of the changing of initial wall temp.

直後の低回転域では燃焼室内スワール速度<sup>4)</sup>も低く、特に低圧縮比になっているため圧縮圧の低さも影響して、噴霧の貫通力が強くなり壁面付着燃料が多いと考えられる。これが燃焼中蒸発しきれず、膨脹行程でガス流により押し出され、排気管内等で凝縮して低温スモークとなるように思われる。

次に煙の色と発生状況を図4の2.5°Cの時を追ってみると、最初の高い山は連爆中のもので不完全燃焼割合が大きい時の白煙である。この時は浮遊粒子の蒸発したのもも放出され凝縮してスモークになると考えて良い。その後4気筒のうち2~3気筒が一時的に燃焼すると、黒煙を含んだ白煙が発生し小さなピークを作る。燃焼が進むにつれ青煙が主体となりオパシティも低下していく。この時のオパシティ変化は壁温の変化と関係が深く、2.5°Cの初期壁温でオパシティが1%になるのは壁温が約40°Cであるが、他の初期壁温条件でもほぼ40°Cでオパシティが1%になっている。この事から壁面付着燃料が低温スモークに大きな影響を与えていると考えられる。なお、この壁温はピストン内の燃焼室壁温でなく、Cyl. Head面の温度であり、ピストン内燃焼室壁温を取ればこの傾向はより明らかになると思う。

#### 4-2 始動時間と低温スモーク

図4をみると始動直後は高いオパシティ値を示すが、この値は初期壁温の上昇とともに急激に低下する。この事は始動時間と関係深い事が容易に想像でき、図4の試験時の完爆時間を#4気筒の燃焼圧から調べたのが表3である。2.5°Cの壁温時は完爆まで116 cycle かかっているのに対し、29°Cの壁温では2 cycle で完爆しており大きな違いがある。この差は単に2.5°Cの低壁温時不完全燃焼により白煙が発生する事だけでなく、燃焼室内に燃料が滞留しそれが完爆後も徐々に放出され青煙となって影響してくる。この状況を知るため、エンジン停止用に使っている吸気シャッターで始動時間をコントロールし、滞留燃料の影響を見たのが図5である。実線はシャッターを完全に閉め燃料をシリンダー内に完全に溜めた場合で、点線は一部燃料を放出しながら完爆させなかった時のスモークの変化である。いずれも20秒でシャッターを全開しているが、この時完爆し高いピークが生じている。時間と

表3 初期壁温と始動時間の関係

Table 3. The relation between initial wall temp. and starting period

記号	壁温 (°C)	水温 (°C)	大気温 (°C)	始動回転 (rpm)	完爆サイクル	完爆時間 (秒)
—	2.5	1	2	222	116	45
—	4	4	8	267	70	21
—	9.5	10.5	16	322	21	5.3
—	20	20	15	545	5	1.1
—	29	20	17	600	2	0

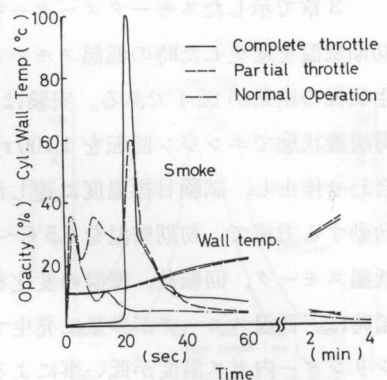


図5 シリンダー内燃料と低温スモークの関係

Fig. 5. The relation between the fuel in the cylinder and cold smoke.

ともにオパシティ値は低下するが、一点鎖線で示す標準始動時のスモークと同一の値になるには、実線のように滞留燃料が多い場合には2分以降になっている。この結果は初期壁温が10°Cの時のものであるが、壁温がもっと低い時には滞留燃料の蒸発は不活発になり、長時間青煙として影響する事が予想できる。

4-3 燃焼変動とスモーク

低温スモークの発生の原因は不完全燃焼によるものであるが、その時の燃焼圧がどのようになっているかを知る事は低温スモーク低減の解決方法を知る上で重要な事である。燃焼変動と低温スモークの関係で、まず図4の壁温2.5°Cの6~8分で青煙が若干高くなっている付近の燃焼圧をみると、図6のようにかなり激しい燃焼変動が見られる。この時のエンジンスピードは800~900 rpmに急変しており、その後の調べて噴射系の異常による事がわかった。このような場合の燃焼変動は燃焼不良によるものでないからスモークに対する影響は少ないが、それでもオパシティ値が1~2%増加している。このように不整噴射による燃焼変動でも低壁温時に起れば、噴射量の多少で完全燃焼の割合が変化し青煙となって表われるので、このような不整噴射を使用回転域で起らないようにしなければならない。この特殊条件以外での燃焼変動を見てみると図7に示すようになっている。壁温2.5°Cと20°Cで比較しても燃焼変動率(標準偏差/平均圧力)で両者の差は0.2%位であり、またその絶対値も1%と暖機時のものと大差なく、この程度の変動では直接青煙に影響しているとは言えない。しかし2.5°Cの始動直後の変動はいわゆる燃焼変動であり、この時の圧力経過を見ると図8に見られるように完爆前後でかなり激しく変化し低温スモークに影響する。また完爆するまでの時間が長いと完爆時の燃焼圧が急上昇し、2.5°Cの壁温時ではオーバースケールする位である。この圧力上昇は、低回転域でのガバナー特性による噴射量の差による事も考

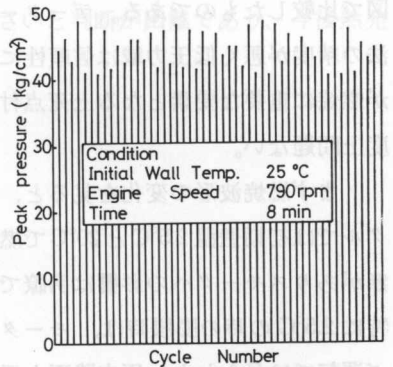


図6 異常燃料噴射時の燃焼圧変動  
Fig. 6. Combustion pressure deviation of abnormal fuel injection.

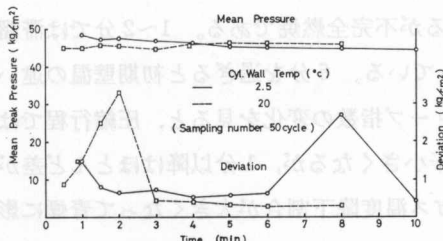


図7 平均燃焼圧、変動圧の時間変化  
Fig. 7. Time process of mean combustion and deviation pressures.

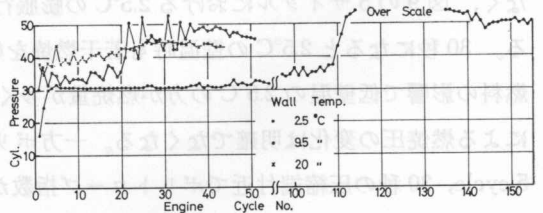


図8 初期壁温変更時の燃焼最高圧の時間に対する変化  
Fig. 8. Time process of peak combustion pressure by changing of initial wall temp.

えられるが、完爆時のエンジンスピードは各温度条件でそれほど差がなく、これは先に述べた滞溜燃料によるもので噴射量に関係なく熱発生するためである。この燃焼圧の経過から滞溜燃料の影響時間を知る事ができ、暖機時の燃焼圧に近づくまでと考えて良い。このような実験結果より、燃焼変動の影響は主として始動直後だけであり通常はスモークに影響を与えないと言えるが、燃焼圧の時間経過より滞溜燃料の影響がかなりの時間ある事がわかった。

4-4 初期壁温と指圧線図

図8のような燃焼最高圧の変化より低温スモークの発生状況を考察する事はできたが、サイクル中の発生状況を知るには熱発生率やポリトロップ指数の変化を調べる必要がある。図9はポリトロップ指数の変化を知る目的で、初期壁温2.5°Cと20°Cの時の圧力経過を同一時間でlog P-log V線図で比較したものである。データー処理方法の精度が悪く低圧力域は信頼性に欠けるが燃焼に重要な要素となる上死点付近は精度上問題ない。

まず燃焼波形の変化を見ると、5サイクルでは初期壁温2.5°Cと20°Cで燃焼の有無がありスモークへの影響は明瞭である。特に2.5°Cの時の膨脹時は、モーターリング運転では見られない圧力降下を示している。通常モーターリング時は図10に示すように、圧縮行程と膨脹行程の圧力差は少なく、図9の5サイクルにおける2.5°Cの膨脹行程の変化は燃料の蒸発によるものと考えられる。

30秒になると2.5°Cの壁温時も若干燃焼を始めるが不完全燃焼である。1~2分では滞溜燃料の影響で低壁温の2.5°Cの方が燃焼量が多くなっている。6分を過ぎると初期壁温の違いによる燃焼圧の変化は明確でなくなる。一方ポリトロップ指数の変化を見ると、圧縮行程では5 cycle, 30秒の圧縮端付近でポリトロップ指数が若干小さくなるが、1分以降はほとんど差がない。この事より、低壁温時ほど放熱量が多くなりガス温度降下割合が大きくなって青煙に影響するとは言えない。また、膨脹時の5サイクルのような場合はポリトロップ指数の差も明確であるが、燃焼時はそれほど明確ではなく、青煙の評価ができるほどではない。ただ、1, 2分ではポリトロップ指数の変曲点より燃焼期間が推定でき、低壁温ほど燃焼期間が長く低温スモーク

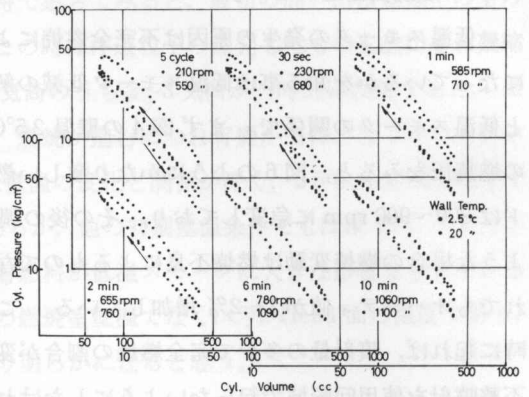


図9 初期壁温による圧力線図 (log P-log V) の違い

Fig. 9. Difference of pressure diagram (log P-log V) by initial wall temp.

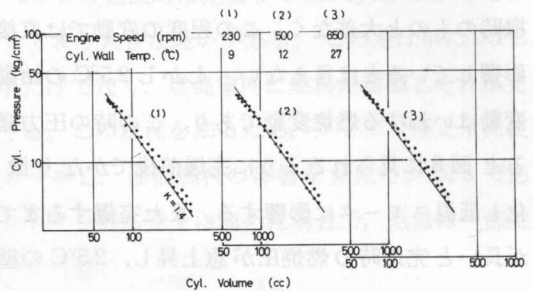


図10 モーターリング時の指圧線図

Fig. 10. Pressure diagram when motoring.

クに影響している事が予想できる。

このように  $\log P$ - $\log V$  線図では燃焼波形に特徴のある時は低温スモークとの関係を考察できるが、変化が少ない時は適確な評価はできず、今後熱発生率の計算等を加えて検討したい。

## 5. ま と め

(1) 従来の光透過式スモークメーターで低温スモークの有無を判断する場合、判断基準はオパシティ1%と測定精度上問題はあるが、ゼロ点校正をしながら使えば可能である。

(2) 壁温変化に対する青煙変化を調べた結果、このエンジンの場合、運転条件にかかわらず40°C近くでオパシティ1%になり青煙が消える。

(3) 低温時のように完爆までの時間が長ければ燃焼室内滞留燃料が増加し、その影響が完爆後も現われ青煙に影響する。

(4) 完爆後の燃焼変動率は1%位であり、初期壁温が2.5°Cと20°Cでも変動率の差は0.2%位にしかならず、正常燃焼時の燃焼変動は青煙にそれほど影響しない。

(5) ポリトロップ指数により低温スモークの発生状況を考察したが、燃焼波形に差が大きい時は関係を見い出せるが、時間が経過し燃焼圧の差が小さいと判断が困難であり、今後熱発生率の計算を加えて検討したい。

## 文 献

- 1) Yanagihara: MTZ, 36-7/8, p. 220 (1975).
- 2) Golothan: SAE paper, 670092, (1967).
- 3) 村山: 内燃機関, Vol. 14-2, p. 50 (1975).
- 4) R. Watt: Diesel comb. sympo., No. 17, p. 167 (1970).

## 1. 緒 言

まれ試験前の子加工の疲れ過程に与える影響<sup>1)</sup>、噴射孔の疲れと裂の進展<sup>2)</sup>等についてこれまで各方面で調べられているが、子加工を受けた噴射材における疲れき裂の挙動を、材料的な子加工の影響と、形状的な噴孔による影響とが、き裂の挙動や材料の疲れ強度のような因果関係を持つかを観測して、検討を加えることが本研究の目的である。なお、この挙動はその長さ、進展速度、向きなどについてとらえている。

## 2. 実 験

### 2.1 試験材と試験機

試験材はS35C鋼製材料で表-1にその化学成分と機械的性質を示す。試験機は京科を