6 ディーゼルエンジンの燃焼改善

における可視化技術の活用

日野自動車工業㈱

鈴木 孝幸 塩崎 忠一 西田 雅彦

Application of a Flow Visualization Technique to the Combustion Tuning of Diesel Engines

T.Suzuki T.Shiozaki M.Nishida

In the combustion tuning of high speed, direct injection diesel engines, it is very important to optimize the cavity configuration on the piston crown. An understanding of the air motion induced in the combustion chamber is an important factor in combustion tuning. In order to investigate combustion phenomena, a surface flow visualization technique employing an oil film method was used to study the air motion in the combustion cavity of a single cylinder engine. In addition, a high speed camera was employed in the investigation of combustion phenomena.

As a result, it was confirmed that optimum combustion is obtained by having a suitable recess in the circumference of the cavity. The authors describe here in detail a flow visualization study and the test results of engine performance in the study.

1. まえがき

近年、排ガス低減、燃費低減、過給等による比出力の向上に伴い、燃焼室形状も従来多く用いられているトロイダル型燃焼室から変化し、多少複雑化した燃焼室になっている。その目的とする所は、燃焼室の壁面形状を利用して、流れに変化を与えることにある。燃焼室内の流れの把握には、燃焼以前の空気流動を把握する場合と、燃焼ガスの流動を把握する場合とがある。空気流動の把握には、熱線流速計⁽¹⁾⁽²⁾、やレーザ流速計等による平均流速や乱れの測定によって絶対値を評価する場合と、メタアルデヒドのトレーサ法⁽⁴⁾、火花放電法⁽⁵⁾、油膜法等⁽⁶⁾⁽⁷⁾による流れの可視化によって、流れの方向や大きさを全体的に観察（巨視的に把握）する場合とがある。上述の測定法や可視化法は、油膜法を除いて、いずれも多少複雑な技術が必要となり、煩雑である。しかるに、今後更に燃焼改善を行なう場合、燃焼室の壁面形状が益々重要となるので、油膜法によって簡単に壁面流れ（壁面境界層内流れ）が把握でき、それによって壁面境界層外の空気流動が予測できるならば有用である。

ここではトロイダル型燃焼室の円周壁面に窪みを設けた燃焼室において、主として油膜法を用いて壁面流れを可視化し、燃焼に適した空気流動を得る燃焼室を調べ、且つ単筒エンジンにより、燃焼の改善効果を確認する。更に、燃焼ガス流動の把握の方法として、高速度シュリーレン撮影による可視化が可能であるため⁽⁸⁾、上記燃焼室を供試した場合の燃焼ガスの挙動を観察し、燃焼の改善される根拠について明確にする。

2. 実験装置および方法

実験に供試した単筒エンジンの諸元を表-1に記す。このエンジンは大型自動車用エンジンを単筒化したもので、シリンダーヘッドの脱着が簡単で、ピストンの取り出しが容易な構造をしている。油膜法で使用する油の顔

Hino Motors, Ltd., Hinodai 3-1-1, Hino-shi, Tokyo, 191 Japan

料には、主として酸化チタン（白色）を用いた。なお、クロム酸鉛（黄色）と四三酸化鉛（赤色）を追加した3色（白，黄，赤）の顔料を用い、ピストンの油膜を塗布する位置によって色を変え、流脈パターンの色の变化から、更に詳しい空気流動の把握を行なう実験も試みた。

高速度シュリーレン撮影には、上記単筒エンジンを改造し、図-1に示す燃焼撮影システムを用いて行なった。即ち、燃焼室の下側からガラスピストンを通して燃焼室内を撮影可能とし、シリンダーヘッドおよび吸排気バルブ下面には反射鏡を取り付け、シュリーレン像の撮影を可能にした。

Fig. 1. Experimental arrangement for schlieren photography of test engine

Bore	(mm)	137
Stroke	(mm)	150
Compression Ratio		17.8
Injection Pump		Bosch P
Plunger Diameter		12 ϕ

Table 1. Specification of test engine

3. 油膜法による燃焼室内空気流動の可視化

内燃機関のシリンダー内空気流動を調べるため、浜本らは⁽⁶⁾、頂面がフラットなピストンに、油膜法を適用し、その境界層内流れを可視化した。この結果では、シリンダー内流れの様な非定常流に対しても、ピストン頂面に塗られた油膜は、圧縮行程又は、膨脹行程の上死点（TDC）近傍において流脈パターンとなり、それは最大流速方向に移動する油の流跡と一致する。そこで筆者らは、空気流動の予測が或る程度可能であると判断し、ここではピストン頂面に形成される燃焼室（キャビティ）内の流れを油膜法によって可視化することを試みた。

3-1 トロイダル型キャビティの流脈パターン

図-2は従来多く用いられているトロイダル型キャビティの壁面に酸化チタン（顔料）とオレイン酸の混合液を塗布し、エンジンをモータリング運転した後取り出し、写真撮影したピストンの流脈パターンである。ピストン頂面においては、シリンダー軸を中心とする旋回流（スワール流；図-3参照）とシリンダー壁からキャビティ中心に向うスキッシュ流（図-3参照）とで合成された流れの存在することが判る。更に、図-3に例示することく、スキッシュ流が大となるA側の流れ方向角 θ_1 は、スキッシュ流が小となるB側の流れ方向角 θ_2 より大きいことも判る。

図-4はキャビティ円周壁の流脈パターンを撮影したものであるが、流れの方向がスワール流の場合と逆の方向であるため、この流脈はリバース・スキッシュ（膨脹行程でキャビティ内からキャビティ外へ流出する流れ）を示しているものと推定され

Fig. 2. Streak lines on surface of piston crown obtained through oil film method

Fig. 3. Schematic diagram of piston crown

Fig. 4. Streak lines in trochoidal cavity

る。これらの結果は、従来多くの研究者によって確認されている流れとよく一致しており、油膜法によるピストン壁面の流脈パターンから、空気流動を巨視的に推定することができると考える。

3-2 窪み付き燃焼室の流脈パターン

トロイダル型キャビティでの燃焼を更に改善するためには、前項で可視化できたスワール流やスキッシュ流に対し、新たな流れを与え、その流れによって乱れを増加させることが必要である。その流れを作る方法として、図-5に示す燃焼室を考案した。

即ち、この仮説は次の通りである。キャビティ円周壁に窪みを設け、従来のトロイダル型キャビティではスワール流がエンジン回転数の上昇に伴い過大となってくるのに対し、窪み部形状によって過大なスワール流（図-5 A）を抑制し、また、スキッシュ流によって生じる渦B（図-5 B1 または、B2）の他に、窪みの影響で大きさが異なる渦C（図-5 C1 又は C2）を作り、渦Bと渦Cとの干渉による乱れの生成を図ることである（渦B1, B2, C1, C2, については、後述する）。以下に、窪み部の流れに注目し、空気流動への影響を調べた。

① 窪みの数の影響

図-6, 7は上記仮説を確認すべく、窪みの数4個および5個を有するピストン2種を試作し、油膜法による壁面流れの可視化を行なった結果で、図-6は窪みの数4個、図-7は窪みの数5個の写真である（窪み部形状は同じ）。窪みの数4個の場合、流脈パターンは窪み部においてスワールによる流れ（図-5 A）に影響されず、スキッシュによる流れ（図-5 C）の影響が多少でている（図-6 窪み部縦縞）。即ち、この窪み部は有効な空気流動が少なく、滞留領域となっていることが推定される。窪み数5個の場合も、窪み部においてスキッシュによる流れ（図-5 C）が多少観察されるが、スワールによる流れの影響は微少で、スワール流の面からみれば多少滞留領域になっている。従って窪み部の壁面流れでは窪みの数による差は見出すことができない。

② 窪み深さの影響

図-6, 7の結果から判断し、窪み深さを少なくすることが空気流動の滞留領域を少なくすることにつながると考えられたため、窪みの数4個で、窪み深さを半分に浅くした場合の流脈パターンを調べたのが図-8である。窪み壁においてスキッシュによる流れ（図-5 C）と共にスワールによる流れ（図-5 A）も存在し、窪み部の滞留領域が少なくなったものと推定される。

③ スワール強さと流脈パターンとの関係

キャビティ径を小さくすることにより、キャビティ内スワール

Fig. 5. Schematic diagram of cavity

Fig. 6. Streak lines on a piston having four recesses on the circumference of the cavity

Fig. 7. Streak lines on a piston having five recesses on the circumference of the cavity

Fig. 8. Influence on streak lines by decreasing recess depth of L

は増加する。図-9は上記②に対し窪み部形状を同じにし、キャビティ径を5%小さくし、スワール方向速度のアップを図ったピストンの流脈パターンである。窪み部の流脈パターンから、スワール方向流速の増加による流れ方向の変化が観察できる。図-10は、窪み部での流れ方向を水平に対する傾斜角 β で整理したものである。スワールが一定の場合、スワールによる影響が大ならば β は小となり、スキッシュ（図-5 C）による影響が大ならば β は大となることが推定される。また、キャビティ内スワールが増加すれば、当然 β は小さくなる。図-10のグラフからトロイダルキャビティ（図-4）に対し、キャビティA（図-8）は、スワールの影響が多少減少したため β が増加し、またスワール増加のキャビティ（図-9）は β の減少がみられる。

④ 窪み部の開き角の影響

窪み部の開き角（図-5 α ）の大小が流脈パターンに影響を及ぼすことが推定される。図-11は図-9の $\alpha=70^\circ$ に対し、 $\alpha=50^\circ$ に変更した場合の流脈パターンである。窪み深さ h を一定としたため、窪み部壁面の曲率半径は小さくなっている。

α を小さくすると、窪み部内流れはスワールによる影響が減少し、スキッシュによる流れ（図-5 C）は変化が少ないため窪み部での流れ方向角度 β が増大している。即ち、 α を小さくすると、スワール流の窪み部の存在による減衰が少なくなり、これは窪み部に生ずる流れのスワール方向流れに与える変化（乱れ）が少なくなっていると推定される。

3-3 多色油膜法による流脈パターンの追究

流脈パターン生成の源を知るため、ピストン頂面は白色、キャビティ底面は赤色、キャビティ円周壁面は黄色の顔料を使用した。図-12は3色使用によって得られた流脈パターンの例である。先に仮定した様に、ピストン頂面の流脈は圧縮行程でのスワールおよびスキッシュによる流れが白色で表現されており、一部分リバーススキッシュにより流れ出てきた黄色で染色されている。キャビティ底部の流脈は赤色で、スワールが表現されているが、キャビティ円周壁から流れ出て来たスキッシュによる流れの黄色もある。この黄色の流脈は前述の図-5における渦B1, C1, によって生じたものであろう。キャビティ円周壁面の流脈は黄色のみであり、スワール流およびエンジンの膨脹行程で生じるリバーススキッシュによる流れ（図-5での渦B2, C2,）によって作られた流脈と推定される。以上の様に、3種類の顔料により、流れの源を判別した結果、キャビティ壁面の流れをかなり明確に把握することができた。

Fig 9. Influence on streak lines by increasing the swirl ratio in the cavity

Fig 10. Difference of direction of streak lines with various cavity configurations

Fig 11. Effect on streak lines by decreasing direction angle describing recess area

Fig 12. Typical streak lines using three colors of oil

4. 単筒エンジンでの性能実験

前述の基礎実験と併行し、窪みを有する燃焼室の性能への影響を調べたのが図-13～15である。窪み深さ L を少なくし、滞留領域を多少減らしたものが黒煙、燃費共に良い結果を得た（図-13）。指圧線図から求めた熱発生率は、第1期燃焼ピーク値が大巾に減少し、第2期燃焼が多少増加している（図-14）。第1期燃焼が減少したのは、窪み部での空気と燃料噴霧の混合が改善されてことによる着火遅れの減少に起因する。第1期燃焼ピーク値の大巾減少により、 NO_x が減少し、その分燃料噴射タイミングを進めることが可能となり、燃費低減につながったものと推定される。第2期燃焼の増加は、窪み部の空気流動の活発化によるものと考えられる。即ち、窪み部の空気がエンジンの膨脹行程において図-5の渦C2の様に流出し、スワール流Aや、渦B2と干渉しあうが、その程度が改善されたのであろう。

窪み部開き角 α （図-5参照）を小さくすると、黒煙が多少悪化した（図-15）。窪み深さ L 一定での α を小さくしたため、窪み部の曲率半径は小さくなっている。前述の油膜法で判断された通り、窪み部のスワールによる影響は小さくなり、即ち、滞留領域が増加したため、噴霧と空気の混合がスムーズに進まず、黒煙増加につながったものと考えられる。

上記の結果から判断し、窪み部がスワール流に程よく影響され、且つ、新たな流れを生成し、従来のスワール流やスキッシュ流に、あらたな乱れを与える様なキャビティ形状が、燃焼改善につながっているものと推定される。

Fig 13. Influence on engine performance by varying recess depths of L

Fig 14. Characteristics of rate of heat release and cylinder pressure at the same level of NO emission at varying depths of L

5. 高速度シュリーレン撮影による空気流動および燃焼状態の可視化

上述の油膜法は、キャビティ内窪み部の細かな流れも、かなり把握することができ、今後、益々重要性を増すキャビティ壁面近傍の流れを把握する上で、非常に有用な方法であることがわかった。これに対し、高速度カメラを用いての燃焼撮影は、キャビティ全体の燃焼ガスの流れを巨視的に把握する方法である。これもまた、燃焼を把握する上で非常に重要である。先の油膜法の活用によって得られた最適な窪みを有する燃焼室を設けたガラスピストンを試作し、燃焼撮影を実施した（撮影において用いたシステムは図-1参照）。燃料を噴射しない状態でのモータリング運転において、圧縮、膨脹行程の空気流動が観察できた。圧縮行程の上死点（TDC）近辺において、スワール流とスキッシュ流が、また、膨脹行程ではスワール流と窪み部から流出する空気（図-5 渦C2）の観察ができた。燃料を噴射した発火運転において、燃焼火炎の挙動を観察した結果、スワールに従って流れる燃焼火炎に対し、窪み部で生じた流れが膨脹行程において流出しており、スワール流と合流し、燃焼火炎の混合を更に改善している状態が観察できた（図-16）

Fig 15. Influence on engine performance by direction angle describing recess area

。一般的なスワール流やスキッシュ流に対し、更に混合を活発化する新しい流れが存在し、これが燃焼改善を行なう上で大きなファクターとなっていることが、燃焼撮影によって明確となった。

Fig.16 SCHLIEREN PHOTOGRAPHS OF CERTAIN SELECTED FRAMES OF THE COMBUSTION SEQUENCE ON HMMS-III

6. まとめ

油膜法を用いてピストンキャビティの壁面流れを可視化した結果

- (1) キャビティ円周壁部に窪みを設ければ、その窪み部で生じた流れが、従来からあるスワール流やスキッシュ流と干渉し、乱れを増加させる。
- (2) 窪みの深さ、窪み部開き角を適当に選択することにより、窪み部の空気流動を抑制せずに、乱れを増した流れを得ることができることが判った。

また、窪み部を持った燃焼室を高速シュリーレン撮影し、

- (3) 圧縮、膨脹行程での燃焼室内空気流動の可視化ができた。
- (4) 燃焼火炎に新しい流れが影響を及ぼし、混合の改善を行っていることが確認できた。

上記の2通りの可視化技術を活用した結果、最適な燃焼室が決り、単筒エンジンの性能実験において、燃焼改善ができた。今回求められた燃焼室形状は、ピストンの耐久性の点でまだ確立されるには至っていないため、その面からの追究が必要である。

最後に、本研究に際し、有益な御助言を賜った東北大学 村井等教授に、心から感謝の意を表します。

7. 参考文献

- (1) 鈴木 孝 他1名, 日野技報 No.24(1978-7)P.27 (2) M. J. Tindal et al, IME C127/82
- (3) 神本 武征 他4名, 内燃機関合同シンポジウム 59-1,P.25 (4) 井元 浩二 内燃機関 Vol.13 No.146(74-1),P.11 (5) K. Komiyama et al, SAE Paper 800967 (6) 浜本 嘉輔 第4回流れの可視化シンポジウム 1976-6,15~16,P.1 (7) M. Shigemori et al, SAE Paper 831296 (8) T. Shiozaki et al, SAE Paper 800025