直接噴射式ディーゼル機関の噴射ノズル諸元と アイドル運転時のHC*

常本 秀幸^{*1}, 石谷 博美^{*1}, 若松 俊告^{*2}

Effects of Injection Nozzle Specifications on Unburned HC during Idling in a Direct-Injection Diesel Engine

Hideyuki TSUNEMOTO, Hiromi ISHITANI and Toshitsugu WAKAMATSU

The unburned HC in a direct-injection diesel engine is a cause of exhaust odor and SOF emission. Reduction of HC by changing the injection nozzle specifications was attempted in previous studies. In this study, some experiments in which the mixture formation was varied by using different hole diameters in a multihole nozzle and spray angles to the combustion chamber wall have been conducted. When the diameter of injection holes, which influences the fuel adhering to on the cylinder head walls and the combustion chamber wall, becomes smaller, the HC emission in the idling condition, HC deviation from cylinder to cylinder and HC increase with long idling time are decreased. The same effects were obtained by decreasing the diameter of all holes and by injecting the spray downward to the combustion chamber.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Fuel Injection, Combustion Products, HC Emission, Injection Nozzle, Idling Condition

1. ま え が き

直接噴射式ディーゼル機関のアイドル付近の未燃成分は、臭気発生あるいはモード運転時のSOF増大の原因となるため、種々の低減方法が検討されている^{(1)~(4)}。このうち噴射系に関しては、サックボリューム、噴孔径、 L/D (噴孔長さ/噴孔径)、噴射圧あるいは噴射角などについて種々の研究例が報告^{(5)~(10)}されている。

本研究では、燃焼室内での混合気形成を積極的に変更する方法として、多噴孔ノズルの噴孔径を噴孔ごとに変更した場合、噴孔径を絞った場合、あるいは噴射角を変更した場合について実験を行った。

評価項目はノズルを変更した場合の噴孔間噴射量の変化、噴霧形状、気筒間HCの変動あるいは長時間運転時のHCの挙動等である。

2. 実験装置および方法

使用した機関はボア 105 mm、ストローク 125 mm、

行程容積 6.5 l の水冷 6 気筒直接噴射式ディーゼル機関である。燃焼室は底面に突起をもった角形キャピティで、圧縮比はターボ用として 15.5 にセットされている。噴射ポンプはボッシュ A-D 形であり、ノズル開弁圧は二段開弁圧ノズルの一段めを想定し、16 MPa にセットした。

供試機関のノズル中心は、燃焼室センタとは 6 mm 偏心している。この結果、各噴孔と燃焼室衝突面との距離は標準噴射角($\beta=74.5^\circ$)の場合図 1 のようになり、噴孔間で約 6 mm の差がある。このことを考慮し、供

	Distance to wall (mm)				
Hole number	1	2	3	4	5
L	38	36	32	33	34

Fig. 1 Distance between injection holes and wall

* 1994 年 8 月 18 日 日本機械学会第 72 期全国大会講演会において講演、原稿受付 1995 年 1 月 17 日。

^{*1} 正員、北見工業大学工学部 (〒090 北見市公園町 165)。

^{*2} 学生員、北見工業大学大学院。

試ノズルは、 L/D が 2 および 6 の場合について、表 1 のような噴孔間で噴孔径が異なるノズル、全噴孔径を絞ったもの、さらに噴射角を変更したノズルを試作した。このうち A～D の変更は、ノズル各噴孔と燃焼室壁面との距離に対する、各噴孔からの噴射量の HC に与える影響を調べるためのものである。なお、この場合の噴孔総面積は、全噴孔を絞ったもの以外はほぼ等しくなるように設定してある。

本実験では、噴孔ごとの噴射量を測定しているが、測定は図 2 に示す方法で行った。すなわち、アイドルリング状態で 6 気筒中の 1 番気筒のノズルを大気噴射し、ストロボで噴射初期の噴霧中心を確認しながら、各噴孔部にサンプル容器を当て燃料の捕集を行った。なお、この方法で噴霧角が狭い $L/D=6$ の場合 95% 以上、噴霧角が大きくなる $L/D=2$ の場合でも 90% 以上の捕集率が得られている。なお、エンジンは 700 rpm 一定で運転しており、暖機中はラックをコントロールしている。この場合の噴射量は約 10 mg/st、噴射タイミングは 15°CA である。また異常噴射のないことを、噴射圧波形あるいは針弁リフトにより確認している。

Table 1 Nozzle specifications

Type	Mean β angle	Injection hole dia. mm				
		1	2	3	4	5
S.T.D	74.5°	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
A	↑	0.34	0.29	0.34	0.34	0.29
B	↑	0.35	0.27	0.35	0.35	0.27
C	↑	0.34	0.34	0.29	0.29	0.34
D	↑	0.36	0.31	0.31	0.31	0.31
E	↑	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
F	↑	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
G	70.4°	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
H	65.4°	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32

Size down   Size up

Fig. 2 Schematic drawing of measuring method of fuel volume in each hole

3. 実験結果および考察

3・1 噴孔間で噴孔径が異なる場合の特性

3・1・1 噴孔間での噴射量変動 図 3 は、 $L/D=2$ の種々のノズルについて、おのおの 3 本のノズルを使い、図 1 に示した各噴孔ごとの噴射量を測定し、その平均値を全噴射量に対する比率で示したものである。

標準ノズルのように噴孔径が同一の場合でも、図 1 に示すようにノズルがエンジンヘッド面に対して傾斜して取付けられている場合、ノズル針弁シート部での流れの方向変化が大きくなる #3、#4 噴孔からの噴射量が減少する。これに対して、#2、#5 噴孔を絞った A ノズルおよび B ノズルの場合、#3、#4 噴孔からの噴射量は増大し、#2、#5 噴孔からの噴射量は減少している。この結果、#2、#5 噴孔面積を約 30% 絞った A ノズルでは噴孔間での噴射量の差が少なくなっている。#2、#5 噴孔を絞った目的は、この噴孔が燃焼室壁面に近く、図 4 の STD ノズルの写真に見られるように #3、#4 番噴孔よりも貫通力が強いので、壁面付着量が増大しやすいことで、この噴孔を絞ることにより壁面付着量を減少させることができる。一方、#3、#4 噴孔を絞った C ノズルでは、#3、#4 噴孔の噴射量の減少に応じて #2、#5 噴孔の噴射量が増加している。また、#1 噴孔のみを大きくした D ノズルでは、#1 噴孔の噴射量が増加し、#2 および #5 噴孔の噴射量が減少している。

以上のように、噴孔径の変化に対応し各噴孔の流量は変化するが、必ずしも噴孔面積の変化割合と比例関係にない。これは、微小針弁リフト時のサックボリューム内の圧力分布が、リフト時の針弁の傾き等で変動

Fig. 3 Rate of injected fuel between each hole

Fig. 4 Spray shapes in each nozzle
(Chamber press. 1.8 MPa, 0.8 ms after injection)

することや、各噴孔の流量係数などが影響しあうためと考えている。

3・1・2 噴霧形状の特徴 図4は、 $L/D=2$ の標準ノズル、#2、#5噴孔を絞ったBノズル、#3、#4噴孔を絞ったCノズルおよび#1噴孔を拡大したDノズルでの噴霧の外観写真を示している。図4は、常温高压容器内に噴射した噴霧をストロボによる散乱光を用いて撮影したものである。なお撮影条件は、容器内圧力1.8 MPa、噴射量約20 mg、噴射後0.8 msで単発噴射時の噴霧である。

なお、同一仕様のノズルでも噴霧形状はノズル間で変化するから、6気筒分の噴霧形状について示すべきであるが、ここではそのノズル仕様における代表的な形状の写真を示した。図4から標準ノズルに対する噴霧の貫通力等の差異を知ることができる。

図4に見られるように、#2、#5噴孔を絞ったBノズルの場合、この噴孔の貫通力が弱まるが、#3、#4噴孔の貫通力が強くなり、噴孔間での貫通力の差が少なくなる。一方、#3、#4噴孔を絞ったCノズルの場合、これらの噴孔からの噴射量が減少していたが、この結果に対応し貫通力の弱い噴霧となっている。なお、この写真のノズルの場合、特に#2噴孔の貫通力が強くなっている。

また、#1噴孔を拡大したDノズルの場合、#1噴孔の貫通力は標準ノズルと同等であるが、#1噴孔の噴霧は他の噴孔に比べ噴霧角が大きくなっており、円す

Fig. 5 HC mean volume ($\bar{m}$), standard deviation (σ) of cylinder to cylinder and $\sigma/\bar{m}$ in each nozzle

い形と想定した体積は、#1噴孔の約900 mm³に対し#2、#5噴孔は700 mm³、#3、#4噴孔は350 mm³程度となっており、噴射量が増大した結果と対応している。

3・1・3 暖機終了後のHC濃度 図5は、 $L/D=2$ および6の各種ノズルにおける全気筒のHCの平均値、標準偏差および変動率(標準偏差/平均値)を示したものである。

$L/D=2$ の系統のノズルで、#2、#5噴孔を絞ったBタイプの場合のHCは315 ppmと標準のノズルの325 ppmよりも低い値となっている。一方、#3、#4を絞ったCノズルでは350 ppmまで上昇している。また $L/D=6$ 系のノズルのHCは、 $L/D=2$ 系のノズルよりも高い値を示し、標準ノズルで710 ppmと倍近い値となっている。一方、#2、#5噴孔を絞ったBノズルは590 ppmに減少しており、その差は120 ppmと $L/D=2$ の場合より仕様変更の効果が明確である。

また、HCの気筒間変動の標準偏差および変動率は共にHCの絶対値の高い $L/D=6$ 系のほうが大きくなっている。なお、ノズル仕様間で比較すると、#3、#4噴孔を絞ったCノズルで変化が大きく、#2、#5噴孔を絞ったAノズルで少ない。このように、 L/D ある

いは噴孔諸元によって HC の変化幅あるいは変動率が異なるのは、燃料の壁面付着量が変化することによるものと考えている。

図 6 は $L/D=2$ および 6 の標準ノズルおよび B ノズルの、噴射後 0.8 ms における噴霧形状を示している。

図 6 に見られるように、双方のノズルタイプともに $L/D=6$ のほうが噴霧角が狭く、貫通力が強いことが明らかである。また標準ノズルと B タイプでおおの 4 本のノズルの各噴孔ごとの貫通力の平均値を比較した場合、B タイプはいずれの L/D においても #2, #5 噴孔の貫通力が STD タイプよりも若干弱く、#3, #4 噴孔では 10% 近く増大している。この結果、壁面に近い #2, #5 噴孔からの噴霧は噴射量も少ないことから噴霧の壁面付着量が減少し、HC およびその変動も改善できたものと考えている。

なお、図 5 の HC の変動率が $L/D=6$ で大きいのは噴霧貫通力が強いこととノズル間で変動するためで、特に C タイプのように #2, #5 噴孔の貫通力が増大する場合、ここでの貫通力の変動に対応して壁面付着量も変動し、HC の気筒間ばらつきが増大する。

また $L/D=2$ の場合、噴霧角が大きいことからノズル仕様によってヘッド面付着燃料量が変化し、HC 排出値に影響を与えている。各ノズルとも長時間アイド

ル運転後にヘッドを分解して噴霧の衝突跡を調べているが、 $L/D=2$ の標準ノズルの場合にヘッド面の #2, #5 噴孔付近に形成されていたカーボン付着が、#2, #5 噴孔を絞ることによって減少したのを確認している。一方 #3, #4 噴孔を絞った C ノズルでは、#2, #5 噴孔の噴射量が増加することで、ヘッド面付着量が増大しており、このことが HC を悪化させる原因の一つになっている。

3・1・4 長時間アイドル運転時の HC 濃度 $L/D=2$ の系のノズルでは長時間アイドル運転を行うと、図 7 に示すように時間とともに HC が増加することがある。この原因は、ヘッドのノズル付近で時間とともにカーボンが付着し、これに吸着した燃料の不完全燃焼によることが主原因と考えられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。そこで、ノズル噴孔間で噴孔径を変更した場合の HC およびカーボン付着状況の変化を調べてみた。図 8 はその結果であるが、標準ノズルでは、#2, #5 噴孔付近のヘッド面へのカーボン付着が大きいが、#2, #5 噴孔

Fig. 7 HC change during long idling ($L/D=2$)

Fig. 8 Adhered carbon pattern in nozzle with different hole dia. between each hole ($L/D=2$, after 3hr. running)

Fig. 6 Spray shapes in $L/D=2$ and 6 nozzle
(Chamber press. 1.8 MPa, 0.8 ms after injection)

を絞った A タイプでは、ヘッド上面へのカーボン付着が改善されており、このことが、経過時間に伴う HC の増加傾向の改善に大きく寄与している。

3・2 全噴孔径を絞った場合の特性

3・2・1 噴霧形状 図 9 は、噴孔径を 0.32 mm から 0.28 mm に変更した場合の噴霧形状を示している。今回のノズルは、噴孔長さ一定のもとで噴孔径を絞っているために、 L/D の値は 0.32 mm の噴孔径で 2 であったのに対して、0.28 mm では 2.4 程度となり噴霧角が減少する傾向にあると思われる。しかし、図 9 に見られるようにこのような傾向は見られず、両者の貫通力および噴霧角はほぼ同等である。なお、6 本のノズルについて調べてみると、噴孔径 0.28 mm のほうが噴孔間の貫通力の差異が少ない。これは噴孔径を絞ることによって、サックボリューム内の圧力が早い時期から高くなるための効果と考えている。このことを確認するため、噴射圧と針弁リフトの関係を調

べてみた。

図 10 は、噴孔径が異なる場合のノズルホルダ入口における圧力とそれに対応した針弁リフトの測定結果である。図 10 を見ると、予想とは逆に噴孔径を絞ったほうが噴射中のホルダ入口圧力が低下している。これはアイドルリングのような噴射量が少ない場合、図 10 に示すように針弁リフトは全リフトに達せず噴孔径を絞ったほうがリフトが高くなっている。すなわち、針弁リフトが高くなるのはサックボリューム内圧力が高くなったためであり、逆に針弁シート部における流路抵抗が減少し、ホルダ入口で測定した圧力は低下したものと考えている。

3・2・2 HC 濃度 図 11 は、噴孔径を変更した場合の始動から 40 min の暖機終了後および 3 h 運転後の HC 濃度を示している。 $L/D=2$ のノズルの場合、もともと壁面付着量が少ないことから、噴孔径が小さくなることによる暖機終了付近の HC は、標準の 325

Fig. 9 Relationship between hole dia. and spray shape (Chamber press. 1.8 MPa, 0.8 ms after injection)

Fig. 10 Injection press. and needle life in different hole sizes

Fig. 11 HC change after warm-up and 3hr. running in different hole sizes

Fig. 12 HC change during long idling in different injection directions

Fig. 13 Adhered carbon pattern in different injection directions (after 3hr. running)

ppm に対して 0.28 mm で 310 ppm 程度である。これは、噴孔部体積が標準の 0.32 mm の噴孔の場合に比べ 0.28 mm の噴孔径で約 0.06 mm^3 減少することの影響と考えている⁽¹³⁾。

一方、標準ノズルと噴孔径を絞ったノズルの 6 気筒分の標準偏差は、暖機後では噴孔径による差が少ないが、3 h の連続運転後には 0.28 mm の噴孔径のほうが、0.32 mm の半分以下の値となっている。これは、噴孔を絞ることによってサックボリューム内圧力が早い時期から高くなり、微粒化が進むことあるいは噴霧形状のノズル間変動が減少したための効果と考えている。

3・3 噴射角の影響 図 12 は、噴射角を変更した場合の長時間アイドル運転時の HC の 6 気筒平均値の経過を示している。

図 12 に見られるように、噴射角を燃焼室底面方向に変更した場合、HC の絶対値のみならず長時間運転時の増大を防ぐことができる。これは噴射角を小さく取ることによって、ヘッド面への燃料付着が減少するため、このことは、図 13 に示すヘッド分解後のカーボン付着状態からも明らかである。すなわち、噴射角が小さい場合、標準ノズルのようにヘッド面に付着し

やすかった燃料が減少し、噴霧が燃焼室内全体に広がって燃焼した結果となっている。

このように、アイドル付近だけを考えると噴射角を小さくすることは HC 低減に対して有利であるが、高負荷時の空気利用率などエンジンの総合性能を考えると最適噴射角があるものと思われる。

4. 結 論

(1) 多噴孔ホールノズルの場合、壁面付着が多くなりやすい噴孔の噴孔径を絞ることによって、アイドル運転時の HC を低減することが可能である。なおこの効果は L/D が大きい場合のほうが大きい。

(2) $L/D=2$ 系のノズルの場合、アイドル運転時の HC の気筒間変動は、ヘッド面に燃料が付着しやすい噴孔の噴孔径を絞ることによって改善することができる。この場合、長時間アイドル運転に伴うヘッド面へのカーボン付着が減少し、経過時間に対する HC の増加傾向を改善することができる。

(3) 全噴孔径を絞ることによって、暖機後の HC のみならず HC の気筒間変動、長時間アイドル運転時の HC も改善できる。

(4) ノズル噴孔の噴射角を燃焼室底面方向に変更した場合、暖機初期には改善傾向が明確でないが、暖機運転後あるいは長時間アイドル運転時にはヘッド面でのカーボン形成が減少し HC が改善できる。

文 献

- (1) 佐藤薫・佐藤義彦、いすゞ技報、No. 85(1991)、18.
- (2) 山内博文・ほか 3 名、自技会論文集、No. 43(1990)、40.
- (3) 松井幸雄・杉原邦彦、自技会論文集、No. 34(1987)、45.
- (4) 中川洋・ほか 2 名、第 9 回内燃機関合同シンポジウム講論集、(1991)、97.
- (5) 飯山明裕・ほか 3 名、第 9 回内燃機関合同シンポジウム講論集、(1991)、409.
- (6) 武田好央・ほか 3 名、自技会論文集、25 1(1994)、45.
- (7) 吉津文嗣・中山満茂、自技会論文集、23 4(1992)、3.
- (8) 吉川滋・ほか 3 名、機論、54 502, B(1988)、1522.
- (9) 森一俊・ほか 4 名、三菱テクニカルレビュー、No. 4(1992)、24.
- (10) 常本秀幸・ほか 3 名、自技会論文集、23 3(1992)、9.
- (11) 今野安津志・ほか 3 名、自技会論文集、23 2(1992)、27.
- (12) 常本秀幸・ほか 3 名、自技会論文集、23 4(1992)、14.
- (13) Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, (1988), 624, McGraw Hill.