小形直接噴射式ディーゼル機関における ピストン表面への瞬時熱流束* (ガス流動と燃料噴霧の影響)

針 谷 安 男**, 大八木 重 治**
若 月 祐 之***, 吉 田 正 一****

Instantaneous Heat Flux on the Piston Crown of a Small Size Direct Injection Diesel Engine (Effects of Gas Flow and Fuel Spray Jet)

by Yasuo HARIGAYA, Shigeharu OHYAGI,
Yuuji WAKATSUKI, and Masaichi YOSHIDA

The effects of gas flow (swirl and squish) and fuel spray jet on local instantaneous heat flux on the piston crown of a small size direct injection diesel engine are experimentally investigated. Under the motoring operation, local heat flux on the piston with a flat crown increases with increasing local swirl velocity; and the local Nusselt number is found to be proportional to $Re^{0.43}$, where $Re = 2\pi r v_{\theta,r} / \nu$ with $v_{\theta,r}$ the local swirl velocity at radius r and ν the kinematic viscosity. While for the piston with cavity, local heat flux is strongly influenced by squish flow. Under the firing operation, it is observed that the heat flux at the position where the fuel spray jet collides is mostly determined by the fuel spray jet.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Direct Injection, Heat Flux, Piston Crown, Swirl

1. ま え が き

近年、省エネルギー化や燃料費の高騰に伴い、従来副室式が利用されている小形高速機関の分野に、経済的に有利な直接噴射式ディーゼル機関が進出してきている。小形高速機関は、燃焼室空間や燃焼時間にきびしい制約があり、直接噴射式を利用するにはガス流動の強化や燃焼室形状の変更を伴う。しかし、これらの方法は燃焼室形状を複雑にし、スワールやスキッシュなどのガス流速も増大し、また燃料噴霧や火炎の燃焼室壁面への衝突が生じ、燃焼室壁の局所熱負荷の増大が予想される。

燃焼室壁における熱流束や熱伝達率に関しては、従来から多くの研究が行われてきているが^{(1)~(3)}、小形高速直接噴射式ディーゼル機関を対象とした研究は比較的少なく、Annand - Ma⁽⁴⁾、Dent - Sulaiman⁽⁵⁾、Honenberg⁽⁶⁾らによって報告されている。また最近では急速圧縮装置を用い、スワールの影響⁽⁷⁾や噴霧衝突の

影響⁽⁸⁾による局所の熱流束について調べた報告もみられるが、実機によるこれらの影響について調べた例は少ない。

本研究は、小形直接噴射式機関の熱的問題を検討するに必要となる基礎資料を得るため、シリンダ内ガス流動(スワール、スキッシュ)や燃料噴霧と局所熱流束との関係について明らかにすることを目的としている。これらの結果は、内燃機関の燃焼室内におけるガス流動や燃焼のモデリングを進めるうえで有用な資料となる。

2. 実験装置および実験方法

供試機関はシリンダ内径 $D95$ mm, 行程 115 mm, 圧縮比 18 の単気筒ディーゼル機関であり、燃焼室構造を図1に示す。燃焼室形状はピストンの頂面が平面なもの(F形)とキャビティ付きのもの(C形、キャビティ径 $0.42D$)の2種類を準備し、これらは熱流束測定のためピストン頂面のみ取り替えられるようにした。燃焼室内のスワールはシュラウド付吸気弁を用いて発生させ、スワールの強さとその方向はシュラウド位置を変えることにより変化させた。また、スワール強さは定常流試験法⁽⁹⁾により、スワールの方向は油膜法⁽¹⁰⁾を用いて推定した。燃料噴射ノズルは単噴口で噴

* 昭和60年6月11日 第5回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和60年11月20日。

** 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

*** 正員, 三菱重工業(株)神戸造船所 (〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)。

**** 正員, 芝浦工業大学 (〒108 東京都港区芝浦3-9-14)。

口径 $d=0.15, 0.3, 0.6$ mm の 3 種類を用い、噴射方向はピストン頂面に対して 90° (垂直) とし、各ノズルとも噴射圧 21.6 MPa で燃料を噴射させた。

熱流束は F 形および C 形ピストンともピストン表面上それぞれ 7 点 (図 1) に小形熱流束計⁽¹¹⁾を埋め込み測定した。F 形ピストンの測定位置 MP 12 は噴霧の衝突点に相当する。

実験は、機関回転数 n , シュラウド位置 α を変化させ、駆動運転時および燃焼運転時における各所の瞬時熱流束の測定を行った。なお、燃焼運転時には燃焼室

壁面へカーボンが付着し熱流束への影響が生じるため、各条件ごとにピストン表面のカーボンを取り除き、各部の熱流束は条件設定後 3~5 min 後に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 スワールによるピストン表面流れ模様 シュラウド付吸気弁を用いて燃焼室内に強制的にガス流動を与えた場合のピストン表面上における流れの状態を油膜法により観察した。その結果を図 2 に示す。図 2 中には定常流試験法によって得られたスワール比 σ も併記してある。シュラウド弁を用いないときは、はっきりした流れ模様がえられずピストン表面近傍の流れは流速が遅く方向性もないが、シュラウド弁を用いると燃焼室内に方向性のある強いガス流動が生じることが観察された。流れ方向はシュラウド位置 α を変えて変更することができ、 $\alpha=0^\circ, 150^\circ\sim 240^\circ, 330^\circ\sim 360^\circ$ において旋回流が得られる。 $\alpha=0^\circ$ および $\alpha=60^\circ$ の場合における流れ模様から燃焼室内の流れは剛体渦的な旋回流であると考えられる。またスワール比 σ は $\alpha=0^\circ$ のとき最も大きく $\sigma=4.23$ (900 rpm) であり、 $\alpha=60^\circ$ で $\sigma=2.64$ (900 rpm) である。

3.2 駆動運転時における熱流束

3.2.1 スワールの影響 F 形ピストンを用いた場合の各部の熱流束を図 3 に示す。シュラウドなしの吸気弁を用いた場合、熱流束は各所ともほぼ同様な変化を示し、最大値もほぼ等しい値である。予燃焼室式機関におけるピストン表面の熱流束は、予燃焼室からの噴流の影響を受ける場所では、噴流の強さとそれを受ける時期により熱流束の極大値を二つ持つ波形であるが⁽¹²⁾、直接噴射式機関では予燃焼室式にみられるような噴流の影響がなく、また燃焼室内のガス流動もそれほど局所的にガス流動の分布がない (図 2) ため、各点とも圧縮上死点付近のみに熱流束の最大値を示して

図 1 燃焼室構造と熱流束測定位置 (N: ノズル側, S: 吸気弁側, E: 排気弁側)

図 2 ピストン表面流れ模様 (900 rpm, F 形ピストン)

図 3 各部の熱流束 (900 rpm, シュラウドなし, F 形ピストン)

いる。

シュラウド付吸気弁を用い、燃焼室内にスワールによるガス流動を強制的に発生させた場合における熱流束を図4に示す。熱流束測定位置MPはスワール速度の影響を強く受けるピストン外周部に相当するMP17である。シリンダ内のスワール速度が高いほど熱流束は増大している。燃焼室内圧力は各条件ともほぼ同様な変化を示しており、同一クランク角においてこれらの熱流束の差はスワール速度に依存した熱伝達率の増加によるものと考えられる。また、スワールが存在する場合の各所の熱流束は図5に示すようにピストン外周ほど熱流束は高い。シュラウド付き吸気弁によって生成されたスワールは剛体渦に近い流れを示していることから、周方向速度はピストン半径に比例して増すため熱伝達率がピストン外周ほど高いことが予想される。

次に機関回転数を変化させた場合の熱流束を図6に示す。シュラウド弁の有無により回転数変化に対する熱流束の影響が異なる。シュラウド弁なし〔スワールなし、図6(a)〕では、回転数の増加に伴い熱流束は上昇し、最大熱流束は回転数の0.48乗に比例する。

図4 熱流束（スワールの影響，900 rpm，F形ピストン，MP 17）

図5 局所熱流束に及ぼすスワールの影響
(900 rpm, $\alpha=0^\circ$, F形ピストン)

シュラウド弁を用いスワールが存在する場合〔図6(b)〕，熱流束はシュラウドなしの場合に比べ各回転数とも大きく，また最大熱流束の機関回転数 n に対する増加割合も $n^{0.81}$ と増大している。ピストン中心点ではスワールが存在してもシュラウドなしの場合とほぼ同様な熱流束の変化を示しており，この点はスワールの中心付近に相当しスワール速度の影響は受けず回転数の変化による影響のみを受けることになる。ピストン外周部付近では回転数の増加に伴いスワール速度も高くなり，その結果熱流束が増大する。

3・2・2 スキッシュの影響 C形ピストンを用いた場合（シュラウドなし）の各部における熱流束を図7に示す。測定位置MP53とMP55における熱流束が高く，MP51，54が低い値を示している。測定位置53はスキッシュにより最も激しいガス流動が生じる位置と考えられその影響を受け，また測定位置MP55はスキッシュ流によりキャビティ内に流入したガスによって発生する激しい流動の影響を受け，ともに熱流束が増大すると考えられる。MP51，54はF形ピストン

(a) スワールなし

(b) スワールあり

図6 熱流束（回転数の影響，F形ピストン，MP 17）

ンにおける熱流束とはほぼ同様な値であり、これらの点ではスキッシュ流による影響を受けていない。

次にC形ピストンを用い、スワールを発生させた場合($\alpha=0^\circ$)の熱流束を図8に示す。測定位置MP 54を除き、各点ともシュラウドなしの場合に比べ熱流束は増大している。特に測定位置MP 53, 55における熱流束は高い。またピストン外周部付近でも熱流束は増大し、F形ピストンにおける同条件(図5)の熱流束とほぼ等しい値である。しかしキャビティ内のコーナ部付近では、熱流束はスワールの有無に関係なくほぼ同様な値である。燃焼室内にスキッシュとスワールが組合されたガス流動が存在すると、大部分の場所で熱伝達が増大するが、局所的にはこれらの影響を受けない場所もみられる。キャビティ付燃焼室においては燃焼室内のガス流動を詳細に検討しないと局所的な熱流束の予測が困難であることが予想される。

3.2.3 熱伝達率とスワール速度との関係 以上述べたように燃焼室内にスワールが存在すると局所的に熱流束分布が生じ、局所スワール速度の高いところで熱流束が高くなっている。すなわち、スワール速度

図7 熱流束(スキッシュの影響, 900 rpm, C形ピストン)

図8 熱流束(スキッシュとスワールの影響, 900 rpm C形ピストン, $\alpha=0^\circ$)

の高いところでは境界層厚さが減少し、熱伝達率が増加するため、熱流束が高い値を示すと考えられる。そこでF形ピストンを用い、シュラウド付き吸気弁によってスワールを発生させた場合($\alpha=0, 60^\circ$)に得られた熱流束をもとに局所熱伝達率 α_r を式(1)によって求める。

$$\alpha_r = \frac{q_r}{T_g - T_{wr}} \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 q_r , T_{wr} はそれぞれ半径 r における熱流束と表面温度であり、 T_g はガス温度(測定した燃焼室圧力をもとに状態方程式より算出し、駆動運転であるから燃焼室内は一様な温度分布をしていると仮定する)である。

また、スワール速度 $v_{\theta,r}$ は、吸入行程時に燃焼室内に生成されたスワールは剛体渦で、圧縮膨張行程時には減衰しないと仮定し、定常流試験法で得られたスワール比 σ をもとに式(2)によって求める。

$$v_{\theta,r} = r\omega \quad \text{.....(2)}$$

ここで ω は機関回転角速度である。これらの値と燃焼室内ガス(空気)の物性値および代表長さ $2\pi r$ を用い、ヌセルト数 Nu 、レイノルズ数 Re をそれぞれ式(3), (4)で表す。

$$Nu = \frac{\alpha_r \cdot 2\pi r}{k} \quad \text{.....(3)}$$

$$Re = \frac{v_{\theta,r} \cdot 2\pi r}{\nu} \quad \text{.....(4)}$$

ここで、 k , ν はそれぞれガスの熱伝導率および動粘度である。

このようにして得られた Nu と Re の関係を図9に示す。図9中には回転数が増えた場合の結果も含まれているが、良い相関がみられ、これらの関係は

$$Nu = 0.79 \times Re^{0.63} \quad \text{.....(5)}$$

である。Dentらは Nu に対する Re の指数を0.8とした値を用いている⁽⁵⁾が、今回得られた結果は低い値である。燃焼室内に生成されたスワールは比較的乱れが

図9 $Nu-Re$ の関係(F形ピストン)

少ない状態で回転しているものと思われる。

3・3 燃焼運転時における熱流束

3・3・1 燃料噴霧の影響 燃料噴射ノズル径 $d = 0.6, 0.3, 0.15 \text{ mm}$ を用い燃焼運転を行った場合の F 形ピストン表面の熱流束 (スワールなし) を図 10 に示す。熱流束の最大値が最も高い場所はノズル直下の燃料噴霧が衝突する測定位置 MP 12 であり、この点での熱流束の急激な上昇する時期は燃料噴射時期にほぼ対応している。噴霧衝突点から離れるにしたがい各点の熱流束は急激な上昇時期が遅れ、最大値も減少している。ノズル直下付近における熱流束は燃料噴霧の衝突と燃焼の影響であり、その衝突点から離れた場所での熱流束は燃料の着火遅れと火炎の広がりとの影響を受けるものと考えられる。また、場所的には駆動運転時における熱流束とはほぼ同様な変化を示しており、火炎があまり広がっていないようである。これらの局所熱流束の場所による違いは予燃焼室式機関の場合と同様に考えることができるが、直接噴射式機関においては噴流の影響がなく、燃料噴霧の直接的影響が強く現れている。

ノズル径が変化した場合、燃料噴霧が衝突する点ではノズル径が減少するほど最大熱流束が増大し、燃料噴霧の衝突と燃焼による影響がさらに強くなる。またその他の位置では、熱流束に及ぼすノズル径変化の影響は少ない。

この燃料噴霧の影響をさらに詳細に観察すると (測定位置 MP 12 における熱流束)、熱流束の急激な立上り時期は上死点前 9° であり、動的噴射時期 (上死点前 10°) に対応し、この時期では燃焼による圧力上昇もみられず (熱発生はない)、この時期における熱流束の急激な上昇は燃料噴霧が直接衝突しその影響を受けるためと考えられる。このような現象は急速圧縮装置を用いた実験にも報告⁽⁹⁾されており、燃料蒸気と燃料液滴との混相噴流が壁面に衝突するためと考察している。図 10 に示された熱流束波形は燃焼による影響もほぼ同時に受けているため、セタン価の低い燃料を用いこれらの影響を分けてみると図 11 に示すように、セタン価の低い燃料を用いても燃料噴射時期に対応して熱流束の急激な上昇がみられる。その後熱流束は極大値を示し減少するが、着火遅れのあとの燃焼による圧力上昇に対応して熱流束も再び上昇している。

このように燃料噴霧の衝突点では噴霧の衝突のみにより熱流束の上昇がみられ、直接噴射式機関を小形化するためには噴霧方向を考慮すると同時に噴霧衝突も含めて燃焼室壁の熱的検討を行う必要がある。

3・3・2 スワールの影響 燃焼室内にスワールを与え、燃焼運転を行った場合 (ノズル径 0.6 mm , F 形ピストン) の局所熱流束を図 12 に示す。燃料噴霧衝突点付近 (測定位置 MP 12) では、スワールの変化による局所熱流束への影響はほとんどなく、この付近の熱流

図 10 熱流束 (燃料噴霧の影響, 900 rpm, 当量比 $\phi = 0.23$, F 形ピストン, シュラウドなし)

図 11 熱流束（燃料噴霧衝突の影響, 900 rpm, $d=0.6$ mm, 当量比 $\phi=0.1$, MP 12)

束は燃料噴霧の衝突の影響が強いことがわかる。ピストン外周付近で燃料噴霧の影響を受けないところでは、スワール数の増加とともに最大熱流束は増加し、高熱流束を示す期間も長くなっている。このことはスワール数の増加に伴い燃料噴霧がピストン衝突後燃焼室内にスワールによって拡散し、燃焼領域がスワールのない場合に比べ広範囲となるためであり、局所熱流束も燃焼領域に対応して広範囲で増加することがわかる。

4. 結 論

小形直接噴射式機関を用い、燃焼室における局所瞬時熱流束に及ぼすシリング内ガス流動や燃料噴霧の影響を調べた結果、次のことが明らかになった。

(1) 駆動運転時において、ピストン頂面が平面であるピストンを用い燃焼室内にスワールを与えると、局所熱流束はスワールの影響を受け、スワール速度の高いところほど熱流束は高くなる。また、局所スワール速度を代表速度とするレイノルズ数 R_s とヌセルト数 N_u との関係は $N_u=0.79 \times R_s^{0.63}$ である。

(2) 駆動運転時において、キャビティ付ピストンを用いた場合の局所熱流束はスキッシュ流の高いところおよびキャビティ内ガス流動を強く受けるところで高い値を示し、キャビティなしの場合に比べ約 1.5 倍である。さらにスワールが存在すると熱流束はさらに高い値となる。

図 12 熱流束（スワールの影響, 900 rpm, 当量比 $\phi=0.23$, $d=0.6$ mm, F 形ピストン)

(3) 燃焼運転時において、燃料噴霧が衝突する位置では、スワールの影響より噴霧衝突の影響を強く受け、局所熱流束は燃焼の有無に関係なく高い値を示し、最大熱流束は駆動運転時の約 4 倍である。噴霧衝突点を除く各点の熱流束はスワールおよび燃焼の影響を受ける割合により局所的に異なる。

本研究を進めるにあたり、スワールを評価する定常流試験法は鳥取大学 田辺征一助教授にご助言をいただき、また噴射ノズルはディーゼル機器(株)に特別に製作していただいた。また本報をまとめるにあたり、本学 辻 廣教授に種々ご助言をいただいた。以上の方々に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 小栗, 自動車研究, 2-9 (昭 55), 12.
- (2) Sitkei, G., *Heat Transfer and Thermal Loading in Internal Combustion Engine*, (1974), 61, Akadémiai Kiadó.
- (3) Pflaum, W. und Mollenhauer, K., *Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine*, (1977), 41, Springer-Verlag.
- (4) Annand, W. J. D. and Ma, T. H., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 185-72/71 (1970-71), 976.
- (5) Dent, J. C. and Suliaman, S. J., *SAE Paper*, 770407 (1977).
- (6) Hohenberg, G. F., *SAE Paper*, 790825 (1979).
- (7) 西脇・脇谷, 機論, No. 780-16 (昭 53-10), 13.
- (8) 神本・ほか 3 名, 機論, 49-440, B (昭 58), 901.
- (9) 田辺・ほか 2 名, 機論, 43-370 (昭 52), 2307.
- (10) 浜本・柴垣, 自動車技術会論文集, 16 (昭 53), 51.
- (11) 吉田・ほか 2 名, 機論, 45-391, B (昭 54), 416.
- (12) 吉田・ほか 2 名, 自動車技術会論文集, 19 (昭 54), 3.