

予燃焼室式ディーゼル機関燃焼室各部の熱の流れ*

(第2報, シリンダヘッド燃焼室面における熱の流れ)

吉田正一**, 針谷安男**, 佐藤 薫***

Masaichi YOSHIDA, Yasuo HARIGAYA, Kaoru SATO

1. ま え が き

近年のディーゼル機関は比出力の向上に伴い、燃焼室を構成する部材は熱応力による破損の危険にさらされている。これと併せ、熱損失の問題を解明するためには燃焼ガスから各部材への熱流束の時間的、場所的变化を明らかにする必要がある。これまで、多くの研究者により、実験的、理論的に燃焼室内における熱伝達率の式^{(1)~(4)}が提案されているが、これらはいずれも燃焼室壁の一点で全表面における値を代表させている。著者らが、これまでに行った予燃焼室式ディーゼル機関のピストンクラウン表面における熱流束の測定によると、火炎伝ば、ガス流動などの影響で場所的にも時間的にもかなり異なることが判明した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本報告は前報⁽⁵⁾と同一機関のシリンダヘッド燃焼室面各所(吸・排気弁の燃焼室にさらされている面は除

く)における熱流束を測定し、この時間的、場所的变化を調べ、予燃焼室噴口からの噴流の影響の推定およびピストンクラウン表面における熱流束との比較を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 供試機関 供試機関はシリンダ内径 95 mm, 行程 115 mm, 圧縮比 20 の単シリンダ無過給水冷予燃焼室式ディーゼル機関で、予燃焼室は全燃焼室容積の 36.1%, 噴口面積はピストン面積の 0.59% ($\phi 5.0 \times 1, \phi 3.5 \times 2, \phi 2.0 \times 1$) である。シリンダヘッドの燃焼室面には噴口からの噴出方向に沿ってみぞが設けてある。またピストンクラウンは平面である。

2.2 熱流束測定 熱流束測定には著者らが開発した小形熱流束計⁽⁷⁾を用いた。シリンダヘッドは燃焼室壁面への熱流束計の取付けを容易にするため、上下に二分割して、これを組合わせて機関に取付けた。熱流束測定位置を図1に、噴口Aを含む燃焼室断面を図2に、噴口Cを含む断面を図3に示す。ピストンクラウン表面の熱流束分布は $N-AN$ 軸(予燃焼室側(N)とこれと反対側(AN)を結ぶ直径)に関してほぼ対称⁽⁷⁾

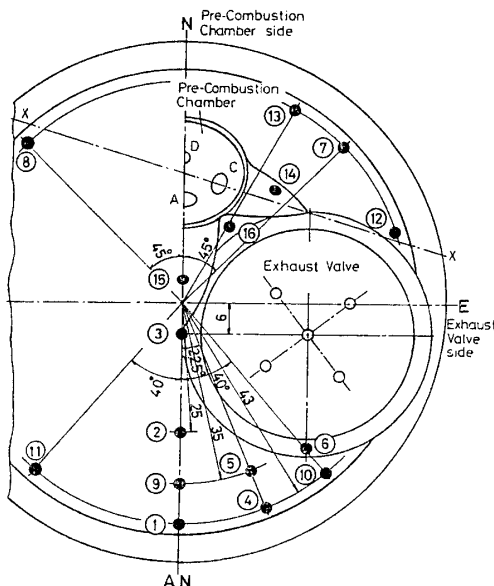
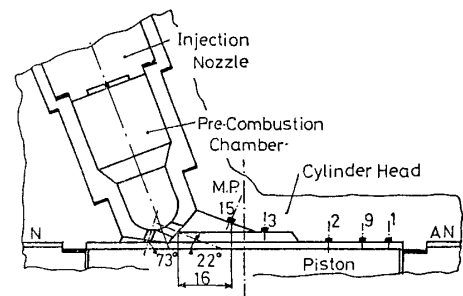
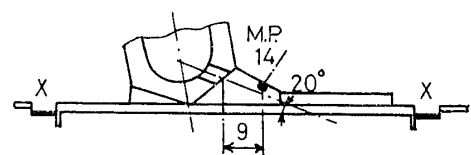


図1 シリンダヘッド熱流束測定位置

図2 主噴口Aを含む燃焼室断面($N-AN$)図3 副噴口Cを含む燃焼室断面($X-X$)

* 昭和53年4月3日 第55期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和54年12月3日。

** 正員, 埼玉大学工学部(〒338 浦和市下大久保 255)。

*** いすゞ自動車会社(〒210 川崎市川崎区殿町 3-25-1)。

であり、またシリンダヘッド表面におけるカーボン付着模様 (図4参照) からシリンダヘッドでも同様であると、測定位置は排気弁側を主に測定し、対称性の検証のため測定位置 (以下 M.P. と表す) 8, 11 の測定を行った。

熱流束計からの導線は防水のためテフロンおよびシリコンチューブに通し、水とう (套) 内から中子砂抜き穴より機関外部に取り出し、記録装置へ導いた。なお、記録装置は前報⁽⁵⁾と同一であるが、表面温度の

読みとりにはトランジェントレコーダを用いた。また、表面温度にはサイクル変動があるので、熱流束の計算には約20サイクルの平均を用いた。

2.3 実験方法 実験は冷却水入口温度 60°C 一定で、回転数 n 、当量比 ϕ を変化させて行い、シリンダヘッド壁面の平均温度が定常になった時点で、熱流束、主燃焼室圧力、吸入空気量、燃料供給量、冷却水入口・出口温度、潤滑油温度、吸入空気温度、排気温度の測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 熱流束 主燃焼室のある場所から流入する熱流束はその場所におけるガス温度、壁温および熱伝達率で決定され、これらは当量比により変化すると思われる、本論文では当量比 ϕ が小さくて予燃焼室内で大部分の燃焼が完了すると考えられる場合として $\phi=0.2$ 、 ϕ が大きく予燃焼室の空気が不足すると考えられる場合として $\phi=0.7$ をとった⁽⁹⁾。熱伝達率は圧力とガス流速およびガス温度によるが、先に行ったガス流動の推定⁽⁶⁾によると圧縮上死点においては、スキッシュ、スワールによるガス流動はほとんど存在しないので、壁面への熱流束に大きな影響を与えるガス流動は予燃焼室噴口からの噴流によるもので、 ϕ により変化すると同時に予燃焼室噴口から離れるほどその影響は少なくなると考えられる。

3.1.1 シリンダヘッド各部の熱流束 (噴流の影響について)

(1) N - AN 軸に対する熱流束の対称性 N - AN 軸に対する対称位置 M.P. 7, 8 および 10, 11 における熱流束変化は図5に示すようにだいたい対称であり、この傾向は他の運転条件においても同様である。当量比を変えたときの平均表面温度 T_{om} および平均

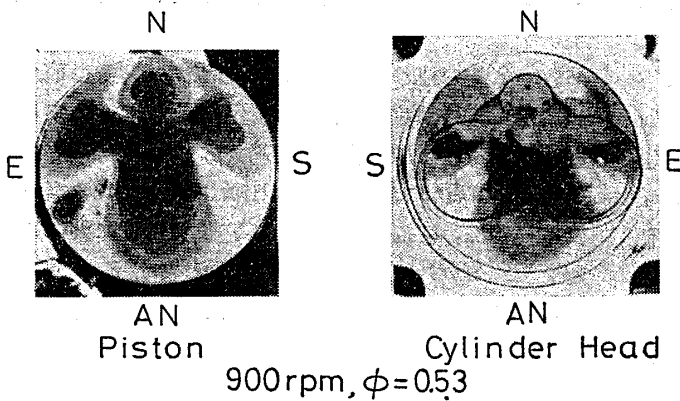


図4 カーボン付着模様

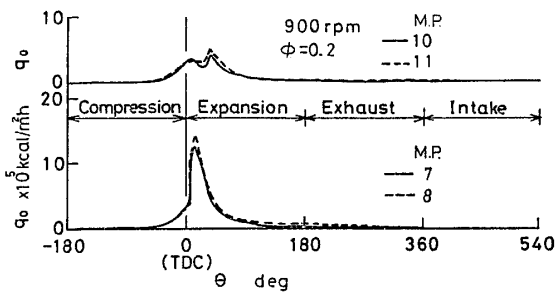


図5 熱流束 (N - AN 軸に対する対称位置)

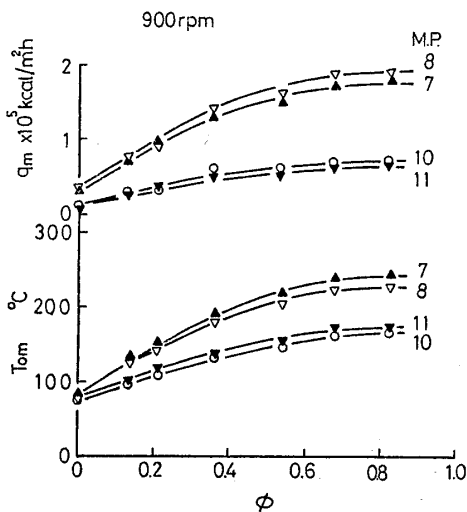


図6 平均熱流束と平均表面温度 (N - AN 軸に対する対称位置)

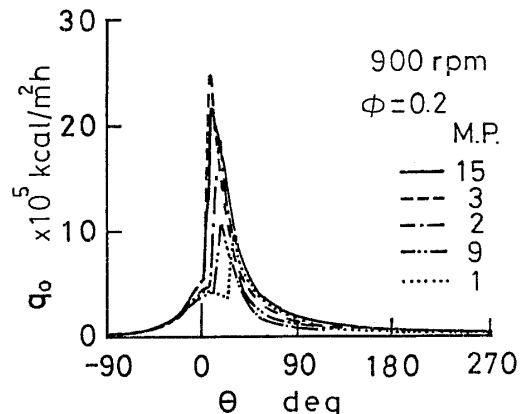


図7 熱流束 (N - AN 軸上測定位置)

熱流束 q_m (図6参照) も $N-AN$ 軸に対してほぼ対称である。なお, 吸気弁, 排気弁における熱流束については第3報⁽⁸⁾で報告する。

(2) $N-AN$ 軸上における熱流束 主噴口 (A) からの噴出方向で噴口から近い順にとった M.P. 15, 3, 2, 9, 1 (図2参照) の $\phi=0.2$ の場合の熱流束を図7に示す。噴口から離れるに従い熱流束の立ち上がりおよび最大値 q_{0max} を示す時期とも遅れる傾向がみられる。これは噴口から離れるほど噴出ガスの到達が遅れていることを示している。また, q_{0max} は噴口から離れるほど小さくなる傾向にある。 $\phi=0.2$ の場合, 噴出ガスはだいたい燃焼が終了したガスを多く含んでいると考えられるので, 噴出ガスは噴口から離れるほど拡散され, 温度が低下し, また噴流速度も減衰し, 熱伝達率が小さくなるためであろう。しかし, 噴口に近い M.P.15 の q_{0max} が M.P.3 より低い値となるが, これは, M.P.15 はシリンダヘッドの噴出みぞ部 (図2参照) にあり, 噴流が直接当たらないからであろう。また, q_m に関しては, 熱の流入期間が関係するので, 図12に示すように M.P.1 と9 (3.2節で更に詳しく考察する) および3と15は逆になる。

(3) 周方向における熱流束 噴口 (A) からほぼ同じ距離にある M.P. 1, 4, 10 の $\phi=0.7$ における熱流束を図8に示す。M.P. 1, 4, 10 の順に熱流束の立ち上がりおよび最大値を示す時期は遅れ, その値

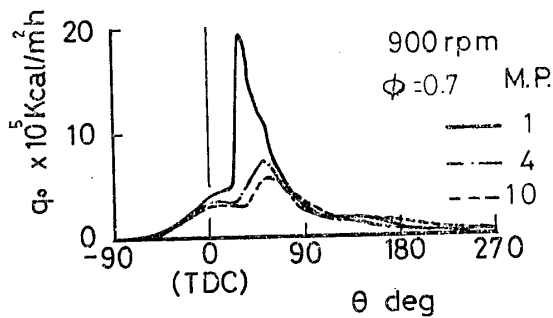


図8 熱流束 (周方向の変化)

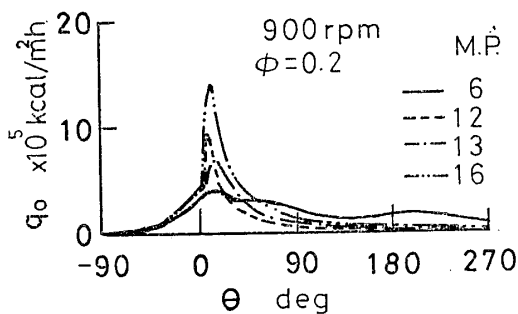


図9 熱流束 (各測定位置)

も低下する。これは噴口 (A) の噴出方向の $N-AN$ 軸上からそれるとともに火炎の到達が遅れ, また火炎およびガス流動の影響が弱くなり, ガス温度および熱伝達率が低下するためであろう。図7に示す $\phi=0.2$ の場合の M.P.1 と比較すると, $\phi=0.7$ では q_{0max} も高く, 熱流入期間も長くなっているのは, 噴口から離れているため主燃焼室の空気との混合により燃焼が行われているためであろう。また, 図8で M.P.1 が特に高い値を示すのは, 3.2節で後述するが, ピストン面からの噴流のはね返りが影響していると考えられる。

(4) その他の位置における熱流束 その他の代表的な位置の熱流束を図9に示す。M.P. 6は噴口より離れた位置で排気弁座まわりのシリンダヘッド表面より3mm沈んでいるので, 噴流および火炎の影響を受けにくく, q_{0max} は小さいが, 排気行程における弁座を流れるガス流動のため再び熱流束は高くなる。M.P.12は副噴口 (C) に近いので, 熱流束の立ち

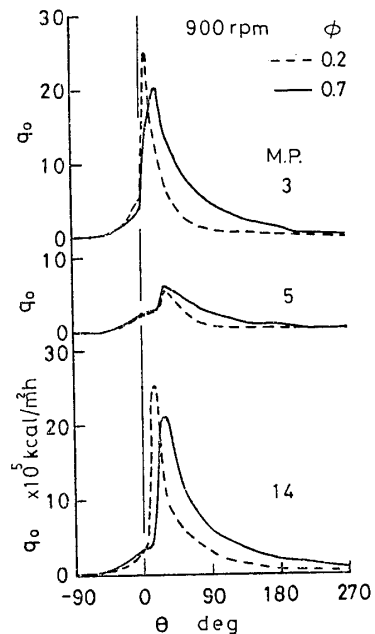


図10 熱流束 (ϕ の変化)

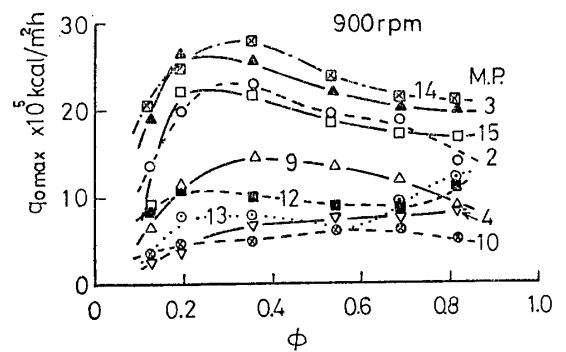


図11 最大熱流束 (ϕ の変化)

上がり時期は早いですが、噴出方向からはずれているため q_{0max} は小さい。M.P. 13 は噴口に近いが噴流の影響を直接受けないので、 q_{0max} は小さく、立ち上がり

時期は M.P. 12 に比べ若干遅れる。M.P. 14 (図 10 参照) 副噴口 (C) の噴出方向みぞ部 (図 3 参照) にあり、噴口に近くガスが直接当たるため q_{0max} は大きく、M.P. 16 は噴口に近いが、主噴口 (A) と副噴口 (C) の噴流ガスの中間に存在するため q_{0max} は M.P. 14, 15 の値より低い値である。

3.1.2 当量比の変化 当量比 ϕ を変化させたときの熱流束を図 10 に、最大および平均熱流束、 q_{0max} 、 q_m をそれぞれ図 11, 12 に示す。噴口からの噴流の影響を受ける位置、例えば、M.P. 2, 3, 9, 14, 15 では ϕ が増すと q_{0max} は小さくなり、噴流の影響が少ない位置、例えば、M.P. 4, 10, 12, 13 では ϕ が増しても q_{0max} の増加はごく少ない。 ϕ がごく小さいときには噴出ガス温度は低いと考えられ、 q_{0max} は低い値を示すが、 ϕ が 0.2~0.3 では予燃焼室内ではほぼ燃焼が終了した高温ガスが噴出されると考えられるため、 q_{0max} は高くなる。さらに ϕ が増すと噴出ガス中に未燃燃料が含まれるため、噴流が直接当たる位置では混合ガスの燃焼が十分進まないためガス温度が低いと考えられ、 q_{0max} は低下する。噴口から離れた位

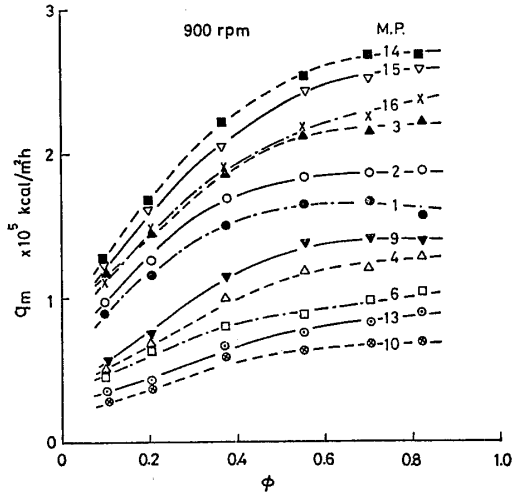


図 12 平均熱流束 (ϕ の変化)

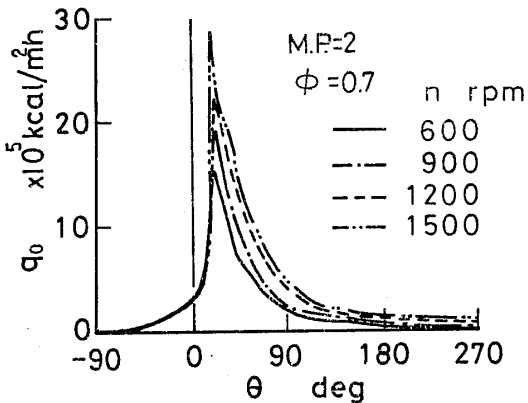


図 13 熱流束 (n の変化)

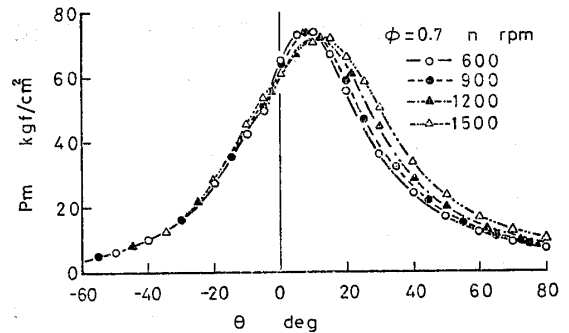


図 15 主燃焼室圧力 (n の変化)

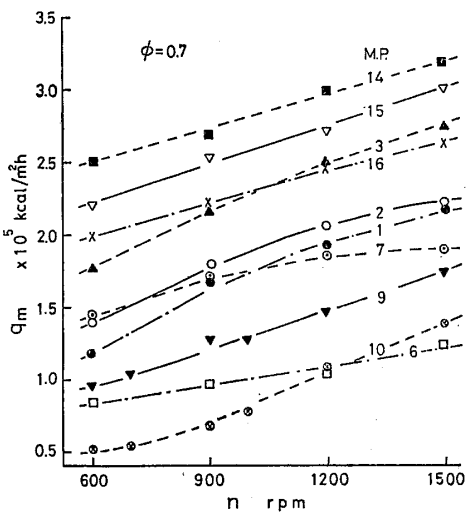


図 14 平均熱流束 (n の変化)

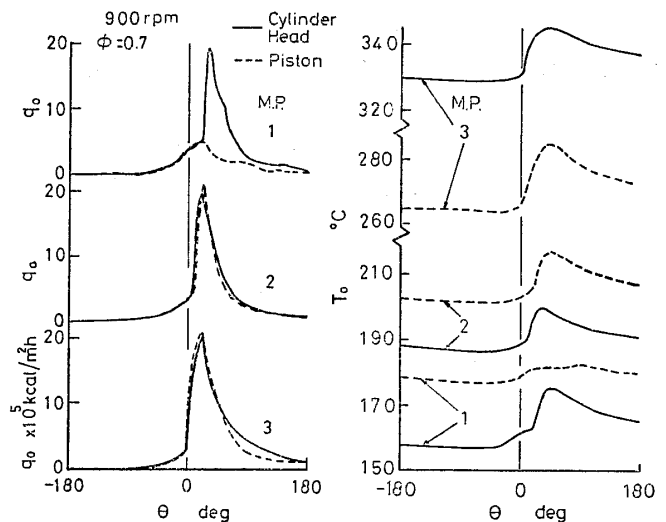


図 16 熱流束および表面温度 (シリンダヘッドとピストンの比較)

置や噴流を直接受けない位置では、未燃燃料を含んだ混合ガスは周囲の空気と反応し高温となると考えられるが、ガス流動が少ないため、 ϕ が増しても $q_{0\max}$ はそれほど大きくならない。しかし、 ϕ が増すと主燃焼室における燃焼期間が増すと考えられるため、各位置とも q_m は増加する。

3.1.3 回転数の変化 $\phi=0.7$ で回転数 n を変化させたときの M.P.2 における熱流束 q_0 を図 13 に、また各位置の平均熱流束を図 14 に示す。回転数の変化による吸入、圧縮行程中における q_0 の差はほとんどみられないが、膨張、排気行程中で回転数が増すほど増加している。これは回転数の増加により、予燃焼室からの噴流速度、主燃焼室内のガスの乱れが増し、熱伝達率が高くなるためおよび動的燃料噴射時期が遅れることにより、膨張行程中、圧力 p_m 、ガス温度が上昇するためであろう。 $\phi=0.7$ で n を変えたときの $p_m-\theta$ 線図を図 15 に示す。以上の理由により、 $q_{0\max}$ 、 q_m (図 13 に示す $q_0-\theta$ 線図の面積に比例する*)とも n とともに大きくなると考えられる。しかし、 q_m を求めるにはこの面積を用いず、表面と深さ約 0.8 mm の点の平均温度の差より求めた。

3.2 ピストンクラウン表面における熱流束との比較 シリンダヘッド M.P. 1, 2, 3 のこれらの点とそれぞれ対向しているピストン表面上の各点の熱流束をおよび表面温度を比較したものを図 16 に示す。M.P.3 では熱流束の立ち上がり時期、最大値を示す時期およびその値もほぼ同じである。M.P.2 ではシリンダヘッドの熱流束はピストンに比べ、立ち上がり時期、最大値を示す時期がわずかに進んでいる。M.P.1 ではピストン表面の熱流束は火炎到達による急激な変化はみられないが、その対向側のシリンダヘッド表面には火炎到達による熱流束変化をみることができ。これは、 $\phi=0.7$ の場合、予燃焼室噴口からの噴流ガス(未燃ガス、火炎、既燃ガス)はピストンに衝突したあと、ピストンとシリンダヘッドの間げきを進むことになるが、M.P.2, 3 付近ではその間げきがせまく、ピストン、シリンダヘッドの熱流束には大きな変化はないが、M.P.1 ではピストンの下降とピストン面からのね返り⁽¹⁰⁾により、シリンダヘッド面

への衝突が著しくなり、ガス流動に伴い空気との混合が増し、シリンダヘッド面に近いところで燃焼が行われているものと考えられる。

4. 結 論

予燃焼室式ディーゼル機関のシリンダヘッド表面における熱流束の測定を行った結果、次のことが明らかになった。

(1) 各部の熱流束は予燃焼室噴口から噴出するガスの影響を受け、噴口に近いほど噴流の到達が早いいため、熱流束の立ち上がり時期は早く、平均および最大熱流束とも大きい値を示す。また、噴出方向から離れるほど熱流束は小さい。

(2) 熱流束は当量比 ϕ の影響をうけ、噴流が主燃焼室における空気との混合によるガス温度降下、または燃焼による温度上昇に関係する。最大熱流束は噴口からの噴流の影響を受ける位置では ϕ が増すと小さくなるが、噴流の影響が少ない位置では、 ϕ の増加に伴い若干増加する。また、平均熱流束は各部とも当量比の増加とともに増す。

(3) 回転数が増すと、平均、最大熱流束とも増す。

(4) ピストン表面の熱流束と比較した結果、予燃焼室から噴出する混合ガス噴流はピストン表面衝突後、はね返りにより混合ガスと空気との混合が促進されると同時にシリンダヘッド側に到達し、この付近では熱流束はシリンダヘッドの方が多し。なお、噴口に近い場所では、噴流の衝突のためピストン表面の熱流束の方が大きい値を示し、噴流の噴出方向から離れ、噴流の影響が少ない場所の熱流束については、それほど差はみられない。

なお、本研究費の一部は昭和 52, 53 年度文部省科学研究費「特定研究・自動車の排気浄化に関する基礎研究」に負い、また研究を進めるに当たり、東海大学 浅沼 強教授、京都大学 浜本嘉輔助教授にご助言をいただき、実験に際して、埼玉大学 吉橋照夫技官、埼玉大学卒業生 神保向一君、福井秀治君、渡辺太郎君にご協力いただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- (1) Eichelberg, G., *Engineering*, (1939), 547.
- (2) Pflaum, W., *MTZ*, 22-3 (1961), 70.
- (3) Annand, W. J. D., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 177-36 (1963), 973.
- (4) Woschni, G., *SAE Paper*, No. 670931 (1967).
- (5) 吉田・ほか 2 名, 機論, 45-391, B (昭 54), 419.
- (6) 吉田・ほか 2 名, 自動車技術会論文集, 19 (昭 54), 3.
- (7) 吉田・ほか 2 名, 機論, No. 780-16 (昭 53-10), 16.
- (8) 針谷・ほか 2 名, 本論文集 1424 ページ.
- (9) 徐, 機論, 32-233 (昭 41), 116.
- (10) 長尾・ほか 3 名, 機論, 26-162 (昭 35), 346.

$$*1 \quad q_m = \frac{n \times 60}{2} \int_0^T q_0 dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 60 \times n \times 360 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式 (1), (2) より

$$q_m = \frac{1}{720} \int_0^{720^\circ} q_0 d\theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 θ はクランク角 deg, t は時間 h, n は回転数 rpm, T は 2 回転の時間 h を表す。

討 論

〔質問〕 小栗 達 (横浜国立大学工学部)

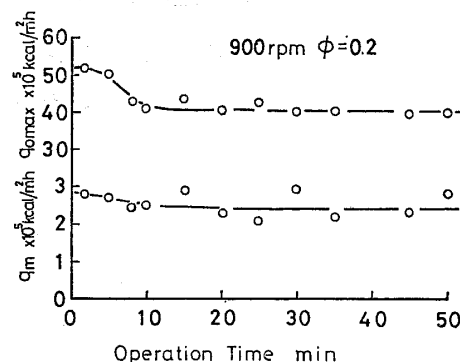
予燃焼室式ディーゼル機関燃焼室各部における、熱の流れ瞬時値を詳細に計測され、多くの知見を与えられたことに敬意を表す。

(1) 燃焼室表面の状態についてはふれていないが、機関長期間運転のまま何も手を加えない状態ということか、燃焼室金属面が露出した状態と、ディポジットなどでおおわれて熱しゃへいした場合の比較などあればご教示願いたい。

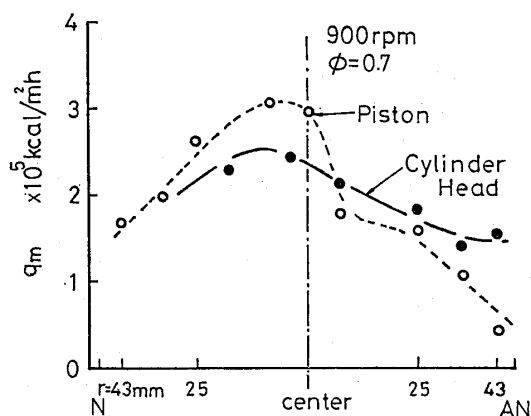
(2) 火炎の衝突ないし接触を受ける部分の、熱流束値が大きくなるがよくわかった。一般に直接噴射式ディーゼル機関では、ピストンの方がより多く火炎に接触しそうに思えるが、予燃焼室式のこの例では図 16 のように、ピストンの方が低めにでてる。しかしこれは比較が相対じ(峙)する点間に行われたためもあると思われる。火炎ジェットの衝突経路を推測し、必ずしも相対じしていなくとも経路にあたる点同士の比較も必要かと感じるがいかか。たとえば図 2 に示される M.P. 15 の直下は噴口 A よりジェット衝突箇所に思えるが、そこと M.P. 3 の熱流束の値など、どのような関係にあるか、おたずねする。

〔回答〕 (1) すべての条件とも、燃焼室壁面にディポジットが定常的に付着した状態で熱流束の測定を行った。また、燃焼室壁面にディポジットが無い状態から機関を一定条件で運転し、熱流束の測定を行ったときの運転時間と最大流束 q_{max} 、平均熱流束 q_m との関係を図 1 に示す。ディポジット層はかなり薄いので、定常流れに対する熱絶縁の効果は少ないので q_m はほぼ一定であるが、ディポジットの無いときの瞬間的な q_{max} は大きいですが、ディポジットのたい積につれて低下し、約 8 分以降はほぼ一定である。

(2) 図 16 における M.P. 1 は、噴流がピストン



付図 1 機関運転時間と熱流束の関係 (ピストン中心位置)



付図 2 $N-AN$ 軸上の平均熱流束分布 (ピストン側とシリンダヘッド側の比較)

面でのね返りによりシリンダヘッド側で熱流束が大きくなることを示している。しかし、燃焼室壁面の高熱流束を示す場所は、ピストンへ直接噴流が衝突するピストン表面側にある。例えば、付図 2 は $N-AN$ 軸上におけるピストン側とシリンダヘッド側での平均熱流束 q_m の分布を示したもので、噴流が直接衝突する付近ではピストン側が大きいことを示している。