

621.436.3 : 536.2

## 予燃焼室式ディーゼル機関燃焼室各部の熱の流れ\*

(第1報, ピストン表面における熱の流れ)

吉田正一\*\*, 針谷安男\*\*, 西田 勤\*\*\*

## 1. ま え が き

内燃機関は、最近、比出力増大の傾向にあり、燃焼室構成部材の熱負荷が増大し、高温強度が問題となってきた。特にピストンクラウン部では高出力化に伴い、ひび割れなどが発生している。しかし、燃焼室各部から流入する熱量およびその時間的経過を調べた結果はあまり見当たらない。特に予燃焼室式ディーゼル機関では、局所的に高熱負荷が生じ、その分布を知ることが必要である。

これまでは、ヌセルト、アイヘルベルグらの実験式により、平均的な燃焼室各部の熱の流れ(以下壁面を通過して単位面積当たり、単位時間に流れる熱量 kcal/m<sup>2</sup>h を熱流束と称する)の推定を行っている。また、ピストン壁面の平均温度を測定し、ピストン内の熱流束を軸対称と考え、電気的シミュレータ<sup>(1)</sup>、数値計算<sup>(2)</sup>などにより、それらを満足するように平均熱流束を推定している。しかし実際には、燃焼室は複雑な構造をしており、その上燃焼ガスもガス流動、火炎伝ばなどにより複雑な動きをしているため、各部材を通る熱流束のサイクル中の変化および分布の推定は困難である。また、実験により熱流束を求めている研究もあるが<sup>(3)~(6)</sup>、測定位置に限られており、また予燃焼室式ディーゼル機関については、測定された例はない。

本研究は、応答性の良い小形熱量計を試作し、ディーゼル機関のピストンクラウン部に取付け、クラウン表面の局所的な平均熱流束とサイクル中における熱流束の時間的変化を測定した。またクラウン表面にイオンギャップを設け、火炎到達時期を測定し、各場所における熱流束と火炎の動きとの関係を調べた。その結果、ピストンクラウン表面上各部における熱流束の分布およびこれらのサイクル中の変化は、予燃焼室からの火炎の到達状況と密接に関係することが明らかになった。

\* 昭和52年8月22日 第13回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和52年11月28日。

\*\* 正員、埼玉大学工学部(〒338 浦和市下大久保 255)。

\*\*\* 学生員、埼玉大学大学院。

## 2. 熱 流 量 計

2.1 熱流束の算出方法 周期的に温度変化する壁面が平面で、温度場が深さのみに関する一次元と仮定できる場合、壁温度  $T_w$  は式(1)<sup>(7)</sup>で表される。

$$T_w = T_{m0} - \frac{q_m}{\lambda} x + \sum_{\nu=1}^{\infty} \exp(-x\sqrt{\nu\omega/2a}) \times \left\{ A_{\nu} \cos\left(\nu\omega\tau - x\sqrt{\frac{\nu\omega}{2a}}\right) + B_{\nu} \sin\left(\nu\omega\tau - x\sqrt{\frac{\nu\omega}{2a}}\right) \right\} = T_{m0} - \frac{q_m}{\lambda} x + \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{A_{\nu}^2 + B_{\nu}^2} \exp(-x\sqrt{\nu\omega/2a}) \left\{ \sin\left(\nu\omega\tau - x\sqrt{\frac{\nu\omega}{2a}} + \phi_{\nu}\right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi_{\nu} = \tan^{-1} A_{\nu}/B_{\nu}$$

ただし、 $x$  : 壁表面からの深さ、 $\tau$  : 時間、 $\omega$  : 温度変化の円振動数、 $a$  : 壁材の温度伝導率、 $\lambda$  : 壁材の熱伝導率、 $T_{m0}$  : 壁表面の平均温度、 $q_m$  : 表面を通る平均熱流束

壁表面における瞬時温度  $T_{w0}$  は式(1)で  $x=0$  とおくことにより

$$T_{w0} = T_{m0} + \sum_{\nu=1}^{\infty} (A_{\nu} \cos \nu\omega\tau + B_{\nu} \sin \nu\omega\tau) \dots (2)$$

また壁表面における瞬時熱流束  $q_0$  は

$$q_0 = -\lambda \left( \frac{\partial T_w}{\partial x} \right)_{x=0} = q_m + \lambda \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{\frac{\nu\omega}{2a}} \times (D_{\nu} \cos \nu\omega\tau + E_{\nu} \sin \nu\omega\tau) = q_m + q_{0-p} \dots (3)$$

ただし

$$D_{\nu} = B_{\nu} + A_{\nu}, \quad E_{\nu} = B_{\nu} - A_{\nu}$$

$q_m$  は表面とこれに垂直で表面に極く近い点との平均温度差を測定して求め、また熱流束の時間的変化分  $q_{0-p}$  は表面温度計で実測した表面温度波形を調和解析して、係数  $A_{\nu}$ 、 $B_{\nu}$ 、 $D_{\nu}$ 、 $E_{\nu}$  を算出して求め、これら  $q_m$  と  $q_{0-p}$  を加えることにより、瞬時の表面から流入する熱流束  $q_0$  が求められる。

2.2 熱量計の構造 これまでは、表面温度変化と平均熱流束を同時に、または別々に測定し、表面から流出入する熱流束  $q_0$  を算出する方法が用いられて

いる<sup>(3)-(6)</sup>。表面温度変化は熱接点部を蒸着膜により構成する応答性の良い熱電対が使用されているが、蒸着膜の強度不足の問題がみられる。平均熱流束については、Le Feuvre<sup>(3)</sup>、Whitehouse<sup>(4)</sup>は燃焼室表面の一点とこれから法線上にある冷却面側の点との間の温度差より求めているが、ピストンクラウン部では表面と裏面間の距離が長く、この間の熱の流れが表面に垂直な一次元と考えられない。また小栗<sup>(5)</sup>は測定点の壁内各深さに対して、それぞれの時間平均温度を測定して温度こう配より求めているが、ピストンクラウンに用いるには温度検出部が大きく、局所的な値とすることはできない。

そこで、比較的正確な表面熱流束を求めるため、図 1 に示すような熱流量計を試作した。これによると、表面温度変化と同時に、表面から深さ  $x$  (0.5 mm ~ 1.0 mm) の温度測定が可能であり、また局所的な熱流束測定が比較的容易にできるよう小形化されている。温度測定は銅-コンスタンタン熱電対を用い、熱電対の一方の金属 (コンスタンタン) の表面と深さ  $x$  の 2 点間の時間平均温度差を測定して、平均熱流束を求める。そのため、表面熱接点は直径 2.2 mm のコンスタンタン材に直径 0.5 mm の穴を貫通させて、そこに銅線 (直径 0.3 mm) を通し、セラミック系接着剤を用い、電気絶縁して固定し、端面を銅めっき (厚さ 5 ~ 10  $\mu\text{m}$ ) することにより構成する。内部熱接点は

表面から深さ 0.5 ~ 1.0 mm を残し、直径 0.5 mm の穴をあけ、銅線 (直径 0.3 mm) をそう入して、その先端を電氣的に点溶接して構成する。この熱流量計をピストンクラウン部に取付けるには、セラミック系の接着剤を用い、コンスタンタン内の熱の流れができるだけ一次元となるよう熱絶縁して固定する。

**2.3 深さ (2 熱接点間の距離) の検定** 平均熱流束を求めるには、2 熱接点間の平均温度差、材料の物性値と同時に、内部熱接点の深さ  $x$  を正確に求めなければならない。この距離は製作上、内部熱接点を点溶接により接合するため、正確な測定が不可能である。そのため製作後、表面のめっき面を周期的に加熱し、温度振幅の減衰、あるいは位相遅れを用いて検定する。

周期的加熱によって得られる表面および内部の温度変化分は

$$T_{W0-p} = \sum_{\nu=1}^{\infty} (A_{\nu} \cos \nu \omega \tau + B_{\nu} \sin \nu \omega \tau) \\ = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{A_{\nu}^2 + B_{\nu}^2} \sin(\nu \omega \tau + \phi_{\nu}) \dots \dots \dots (4)$$

$$T_{Wx-p} = \sum_{\nu=1}^{\infty} (F_{\nu} \cos \nu \omega \tau + G_{\nu} \sin \nu \omega \tau) \\ = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{F_{\nu}^2 + G_{\nu}^2} \sin(\nu \omega \tau + \psi_{\nu}) \dots \dots \dots (5)$$

ただし

$$\phi_{\nu} = \tan^{-1}(A_{\nu}/B_{\nu}) \\ \psi_{\nu} = \tan^{-1}(F_{\nu}/G_{\nu})$$

式 (1) より内部温度の変化分は

$$T_{Wx-p} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{A_{\nu}^2 + B_{\nu}^2} \exp(-x \sqrt{\nu \omega / 2a}) \\ \times \sin(\nu \omega \tau - x \sqrt{\frac{\nu \omega}{2a}} + \phi_{\nu}) \dots \dots \dots (6)$$

式 (5)、(6) より各次数ごとに比較して

$$\left. \begin{aligned} &\text{振幅比より} \\ &x_{A\nu} = [\ln(\sqrt{A_{\nu}^2 + B_{\nu}^2} / \sqrt{F_{\nu}^2 + G_{\nu}^2})] / \sqrt{\nu \omega / 2a} \\ &\text{位相差より} \\ &x_{\phi\nu} = (\phi_{\nu} - \psi_{\nu}) / \sqrt{\nu \omega / 2a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

それぞれ深さ  $x_{A\nu}$ 、 $x_{\phi\nu}$  が求まる。周期的な加熱が安定し、熱流量計の側面が完全に断熱され、一次元流れであれば、 $x_A = x_{\phi}$  となる。深さ  $x$  を求めるため、熱流量計をピストンに取付け、機関運転により周期的に加熱し、表面および内部の温度変化を測定して求める。なお、物性値については、伝熱工学資料<sup>(8)</sup>の値を用いる。

**3. 実験装置と実験方法**

供試機関はシリンダ内径 95 mm、行程 115 mm、圧

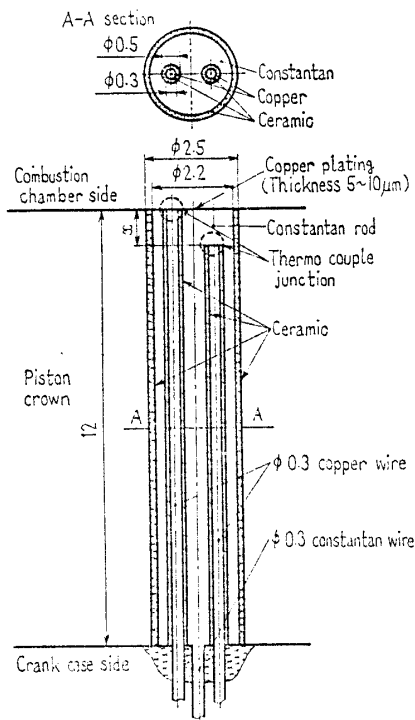


図 1 熱流量計の構造

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 (図2) はピストン中心より偏って設置されており、また容積比 36.1%, 噴口面積比 0.59% ( $\phi 5.0 \times 1, \phi 3.5 \times 2, \phi 2.0 \times 1$ ) である。ピストンは Y 合金製で、クラウン表面は平面で、実験の

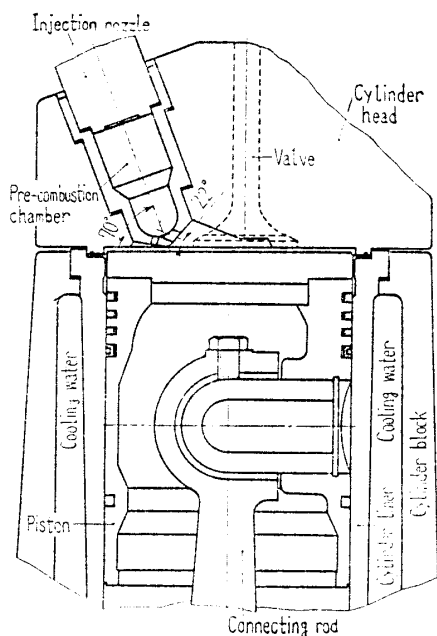


図2 燃焼室 (ピストン上死点位置)

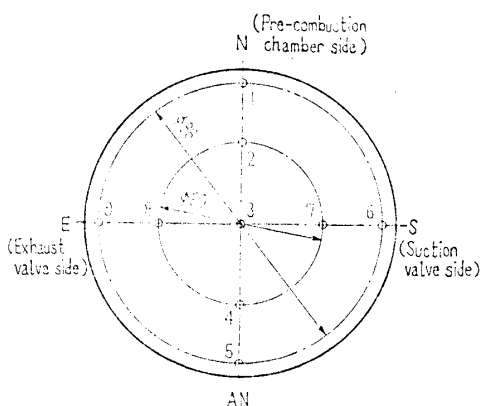


図3 熱流束測定位置

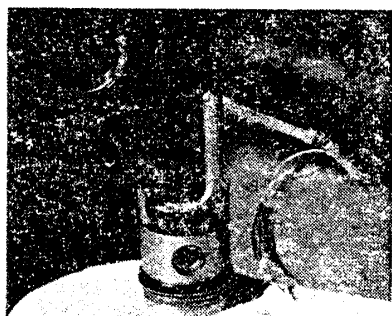


図4 リンク装置

ため熱流量計の取付けが簡単にできるようにクラウン部を取りはずせる構造に改造した。熱流束測定位置は図3に示すようにピストンクラウン上9点であり、各点の温度変化を機関外部に取り出すため、図4に示すリンク装置を用い、リンク部に取付けて引き出すコンスタンタン導線は  $\phi 0.15 \text{ mm}$ , 裸線3本, 銅線は  $\phi 0.1 \text{ mm}$  のエナメル被覆線4本をゆるくより合わせたより線とし、それぞれ外径  $\phi 1.0 \text{ mm}$  の18本のテフロンチューブに通して、リンクに固定し、一度に6点の熱流束の測定ができるようにした。熱流束測定回路は図5に示すように、温度変化は直流増幅器 (パイアス装置付き) で 500~1000 倍に増幅し、データレコーダ (4チャンネル) に記録して、電磁オシログラフに再生する。またはシンクロスコープ (4チャンネル) で波形を観測し、多重写真撮影する。平均温度は、自動平衡記録計 (ペン書き) を用い、表面と内部熱電対の起電力およびこれらの起電力差の3点を記録すると同時に、表面と内部熱電対の起電力差はポテンショメータを用い、時間平均値を測定する。

火炎到達時期はピストン表面にイオンギャップ 60 個 (図6, 図中A, B, Cについては後に説明する) を設け、各点のイオン電流を測定する。リード線の機関外への取り出しは、前述のリンク装置を用い4回に分けて行い、イオン電流変化は、シンクロスコープで波形を観測し、多重写真撮影する。なお、ディーゼル機関ではピストン表面にカーボンの付着があり、イオン電流の測定が不可能となるため、図7に示すように、イオンギャップを表面より 1 mm 燃焼室側に突き出して取付ける。

実験は、冷却水入口温度  $60^\circ \text{C}$  一定に保ち、燃料供給量、回転数を変化させて行い、平均ピストン温度が定常になった時点で (運転条件変更後 3~5 分)、ピストン温度の平均値と変化分、冷却水入口と出口温度、排気温度、吸気温度、潤滑油温度、潤滑油圧力、燃焼圧力、動的噴射時期、吸入空気量、燃料供給量、回転数、動力計荷重を測定する。

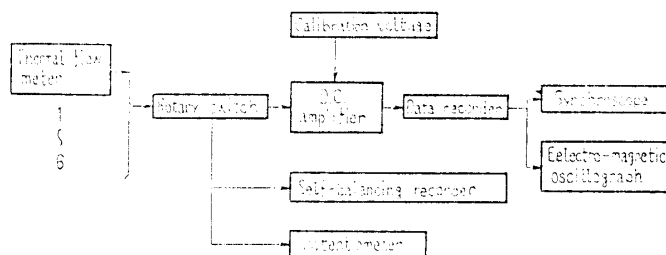


図5 熱流束測定回路

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 表面温度と熱流束

4.1.1 表面温度変化 図 8 に表面および内部温度変化の測定例を示す。燃焼圧力はほとんどサイクル変動がないが、表面温度変化はサイクルごとに温度の立ち上がり時期、最高の時期および最高値が変動しており、これらの変動は測定位置、運転条件により異なる。また内部温度変化はサイクル変動がほとんどみられない。これは表面温度変化の変動は高次項であり、内部温度変化には減衰のため、影響が少ない。なお熱流束  $q_0$  は多重サイクルおよび連続サイクルの測定結果より平均的な表面温度波形について求めた。

また、熱接点間の距離  $x$  は各々の熱流量計について各条件ごとに  $x_A$ ,  $x_B$  を求め、そのうちの振幅比より

求めた  $x_A$  の一〜三次の平均値を用いた。なお、各次数 (一〜三) の  $x_A$  と  $x_B$  との比  $x_A/x_B$  は 0.95~1.06 の値であり、この結果より熱流束測定部における熱流束は一次元に近いと考えられる。

4.1.2 燃料供給量の影響 図 9 に測定位置 3 (ピストン中心位置) の表面温度変化と熱流束変化を示す。表面温度変化は、圧縮行程の上死点前約 50 度位までは降下し、その後、圧縮によるガスの温度上昇と共に上昇する。そして上死点 (TDC) 付近で急激に温度上昇し、TDC 後、約 20~45 度で最高値を示し、膨張・排気・吸気行程とゆるやかに降下する。燃料供給量  $G_f$  が増すと表面温度変化が大きくなると共に、最高温度を示すクランク角は遅れてくる。これは遊離される熱量が増加すると共に燃焼期間が長くなるからであろう。

熱流束は圧縮、排気、吸気行程ではほとんど変化なく、絶対量も極く少ないが、爆発、膨張行程で急激な変化をし、この間にサイクル中の大部分の熱が流入している。また  $G_f$  の変化の影響は、これを増すと熱流束

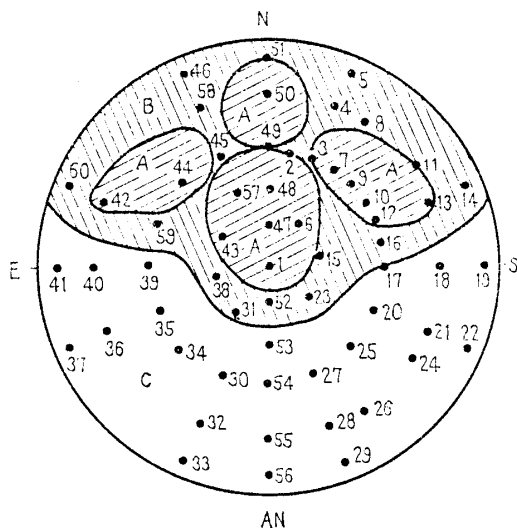


図 6 イオン電流測定位置

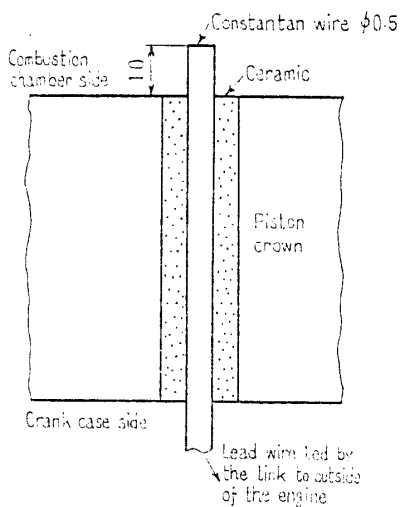


図 7 イオンギャップの取付け方法

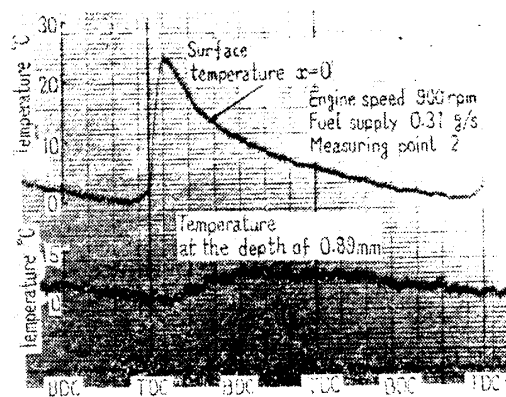


図 8 表面と内部の温度変化

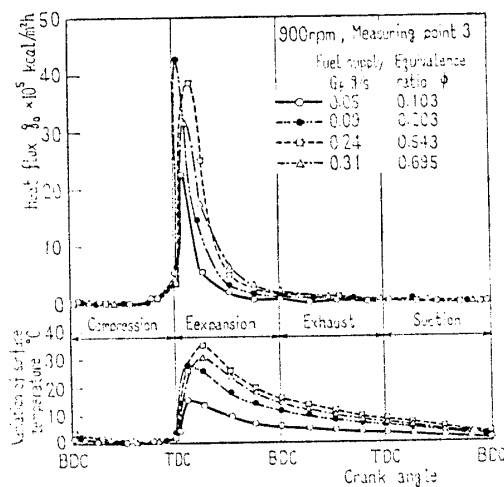


図 9 表面温度変化と熱流束 ( $G_f$  の変化)

が  $5 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  以下の期間は増加するが、瞬時最大熱流束  $q_{0 \text{ max}}$  は  $G_f = 0.09 \text{ g/s}$  (当量比  $\phi = 0.203$ ) で  $42.5 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  を示し、さらに  $G_f$  を増すと減少する傾向を示している。これは  $G_f$  が増すと予燃焼室で燃料過剰となり、主燃焼室へ噴出されるガス中に未燃の燃料を含み、燃焼ガス温度が下がるためと考えられる。しかし、ピストンとしては、燃焼ガスに接する時間が増し、熱の流入期間が増大する。また、圧縮、排気、吸気行程では、 $G_f$  の変化による影響はあまりない。

**4.1.3 測定位置の影響** 図 10, 11 に燃料供給量  $G_f = 0.24 \text{ g/s}$  ( $\phi = 0.54$ ) における各測定位置の表面温度変化、熱流束変化を示す。図 10 は N-AN を結ぶ線上の各点、図 11 は E-S を結ぶ線上の各点である。表面温度変化は測定位置 3 (ピストン中心) が大きく、最高値のクランク角は ATDC 約 45 度である。測定位置 1, 2 は測定位置 3 とほぼ同様に変化しているが、変化幅は少ない。測定位置 6, 7, 9 は、ほぼ同様な変化を示しているが、測定位置 1, 2, 3 に比べ燃焼による温度上昇点はクランク角で約 10 度遅れ、温度上昇

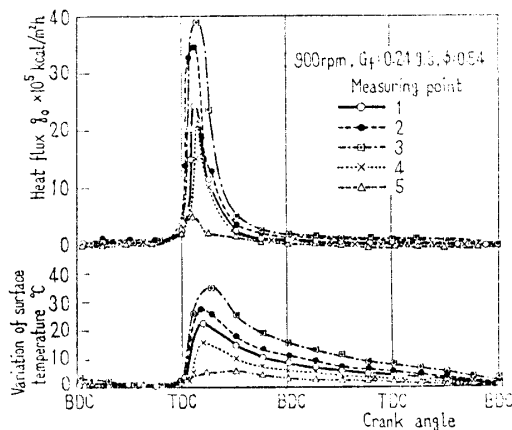


図 10 表面温度変化と熱流束 (測定位置変化)

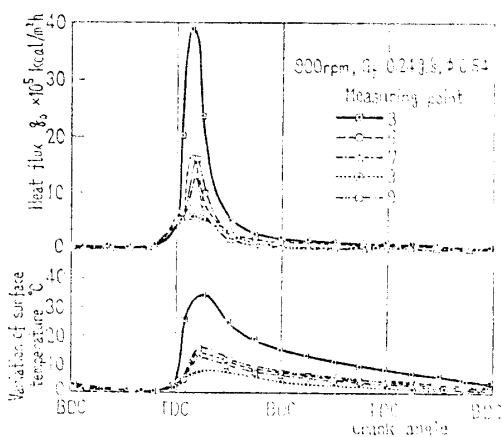


図 11 表面温度変化と熱流束 (測定位置変化)

率も低い。測定位置 5, 8 は圧縮行程では温度上昇がみられるが、爆発、膨張行程ではほとんど変化がみられない。また測定位置 3, 4, 5 を比較すると予燃焼室より離れるにしたがい表面温度変化は小さくなっている。

熱流束は測定位置 1, 2, 3 では TDC 付近から急激に上昇し、最大値のクランク角度は 20~25 度である。測定位置 4, 6, 7, 9 は測定位置 1, 2, 3 より遅れて上昇し、最大値のクランク角度は 25~30 度である。測定位置 5, 8 は ATDC 20 度で最大値を示しているが、燃焼による熱流束の急激な変化はほとんどみられない。また熱流束が  $5 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  以上の期間は測定位置 3, 2, 1, 4, 6, 9, 7, 8, 5 の順に減少している。これら測定位置による表面温度、熱流束変化の違いは、予燃焼室から噴出する混合ガス (未燃ガスと既燃ガス) とピストン表面上の混合ガス流動に関係すると思われる。すなわち、測定位置 1, 2, 3 は予燃焼室から噴出する高速、高温の混合ガスが直接衝突する位置であり、また測定位置 4, 6, 7, 8, 9 はその外側であり、高温混合ガスは存在するが、混合ガスの衝突の影響が少ない。測定位置 5 は予燃焼室からの混合ガスの衝突がなく、噴出したガスの速度は低下し、また混合ガスは空気との混合により冷却され、ガス温度が低下するためと考えられる。

**4.1.4 平均熱流束、最大熱流束、平均表面温度と表面温度変化幅** 以上の結果をまとめ、図 12, 13 に

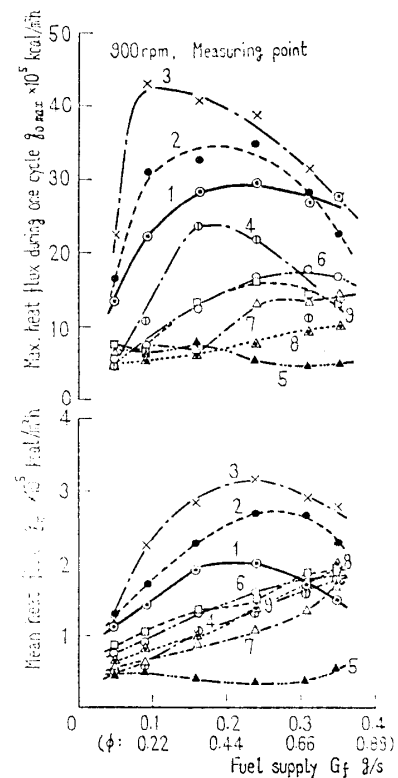


図 12 平均熱流束と最大熱流束

燃料供給量  $G_f$  に対する平均熱流束  $q_m$ , 最大熱流束  $q_{0\max}$ , 平均表面温度  $T_{m0}$ , 表面温度変化幅を示す。

$G_f$  に対する  $q_{0\max}$  は測定位置により, かなり傾向が異なると同時に絶対値も異なる。各条件とも測定位置 1, 2, 3 が大きく, 順に測定位置 4, 6, 9, 7, 8, 5 と小さくなっている。特に,  $G_f=0.09$  g/s 付近で場所による差が大きく, 測定位置 3 は  $42.5 \times 10^5$  kcal/m<sup>2</sup>h であり, 測定位置 8 は  $5.6 \times 10^5$  kcal/m<sup>2</sup>h である。また傾向は, 測定位置 3, 2, 1, 4 は  $G_f=0.09 \sim 0.16$  g/s に最大値をもつが, 測定位置 6, 7, 8, 9 は  $G_f$  の増加とともに増しているが, 測定位置 5 はほぼ一定である。

$G_f$  に対する  $q_m$  は測定位置 3 (ピストン中心) が各条件で最高値を示し,  $G_f=0.24$  g/s で最大値  $3.2 \times 10^5$  kcal/m<sup>2</sup>h を示している。また測定位置 4, 6, 7, 8, 9 は  $G_f$  の増加にしたがい直線的に  $q_m$  が増加するが, 測定位置 5 はほとんど変化なく,  $0.45 \sim 0.6 \times 10^5$  kcal/m<sup>2</sup>h である。これは, 測定位置 1, 2, 3 では  $G_f$  の増加と共に燃料過濃のガスが存在し, 測定位置 4, 6, 7, 8, 9 では過濃のガスの存在はなく, 測定位置 5 には, 比較的空気過剰のガスが常に存在することが考えられる。またこれらの平均熱流束  $q_m$  はそれぞれの最大熱流束  $q_{0\max}$  の 1/10~1/15 である。

$G_f$  に対する  $T_{m0}$  の傾向は, 測定位置 1, 2, 3 では  $G_f$  が増加すると温度上昇率が低下してくるが, 測定

位置 6, 7, 8, 9 ではほぼ直線的に上昇する。

$G_f$  に対する 表面温度変化幅は, 測定位置 1, 2, 3, 4 では  $G_f=0.16 \sim 0.24$  g/s で最大値を示し, 測定位置 6, 7, 8, 9 では  $G_f=0.24 \sim 0.31$  g/s で最大値を示し, 測定位置 5 はほぼ一定値を示している。

以上の結果, 測定位置により平均熱流束, 最大熱流束が異なることがわかった。これはそれぞれの位置により, ガス流動, 燃焼状態が異なるためと考えられる。

4.1.5 回転数の影響 図 14 は  $\phi=0.203$  一定に保ち, 回転数を変化させた時の測定位置 3 における表面温度変化, 熱流束変化を示す。回転数の増加と共に

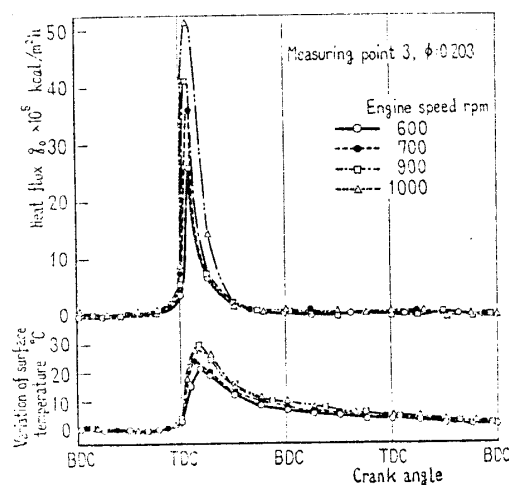


図 14 表面温度変化と熱流束 (回転数変化)

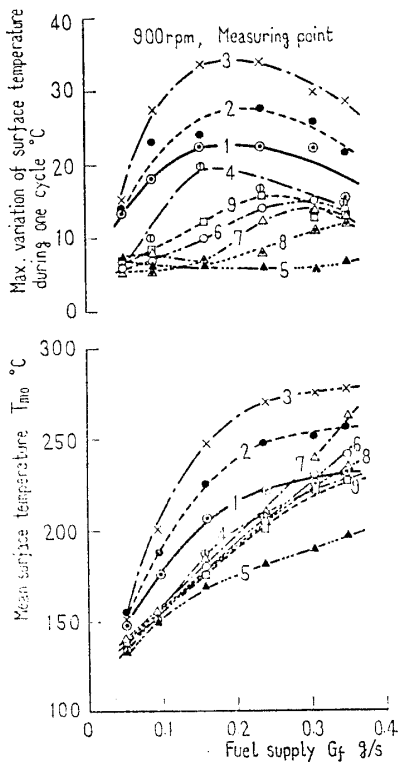


図 13 平均表面温度と表面温度変化幅

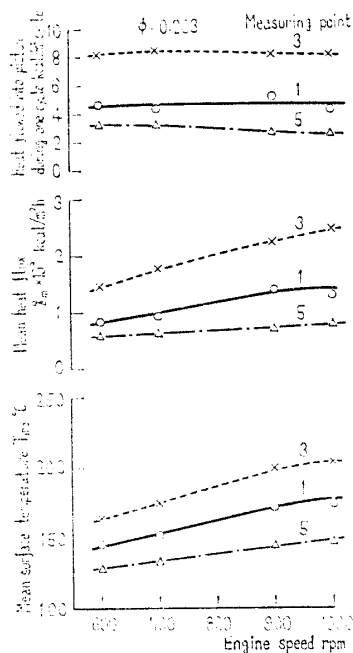
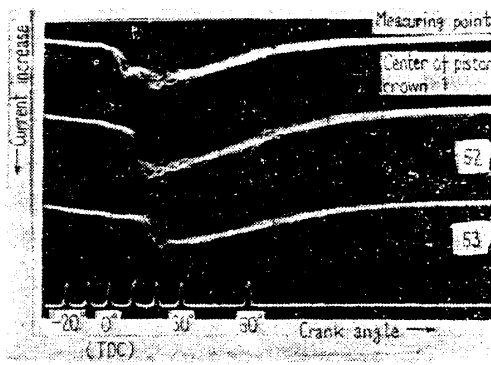


図 15 平均表面温度と平均熱流束 (回転数変化)



900 rpm,  $G_f=0.31$  g/s,  $\phi=0.695$

図 16 イオン電流測定例

熱流束が増加しているのは、単位時間に遊離される熱量と熱伝達率が増加するためであろう。燃焼時の表面温度上昇の時間的割合は回転数の増加に伴い増加している。また平均表面温度、平均熱流束(図 15)も各位置とも回転数の増加に伴い増加しているが、測定位置によりその傾向が異なっている。また1サイクル当たりの伝熱量は、測定位置 1, 3 は回転数を変化させてもほぼ一定であるが、測定位置 5 は回転数の増加に伴い減少している。これは熱流束に及ぼす燃焼室内のガス流動などが測定位置により異なるためと考えられる。

4.2 火炎到達時期

4.2.1 燃料供給量の影響 図 16 にイオン電流測定例を示す(測定位置番号は図 6 参照)。直接予燃焼室から火炎が当たる位置(図 6 の A 部、たとえば図 16 の 1 : ピストン中心)では、火炎到達時期は早く、火炎到達時のイオン電流は急激な変化をしており、かつサイクルごとの変動も少なく、ほぼ一定している。図 6 の B 部(たとえば図 16 の 52)では火炎到達時期が A 部より遅れ、わずかなサイクル変動がみられる。予燃焼室から遠い点(図 6 の C 部、たとえば図 16 の 53)では、火炎到達時期が A, B 部より遅れ、サイクル変動が多く、火炎到達時のイオン電流の変化が小さい。またこの地域では、 $G_f=0.16$  g/s ( $\phi=0.364$ ) 以下において大部分でイオン電流を検知することができず、この条件では火炎が存在しないものと考えられ

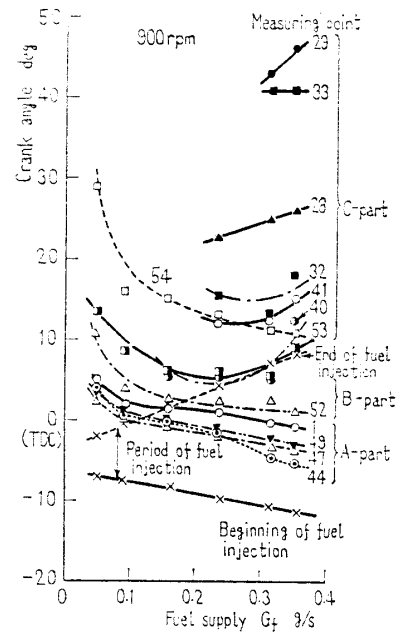


図 17 火炎到達時期

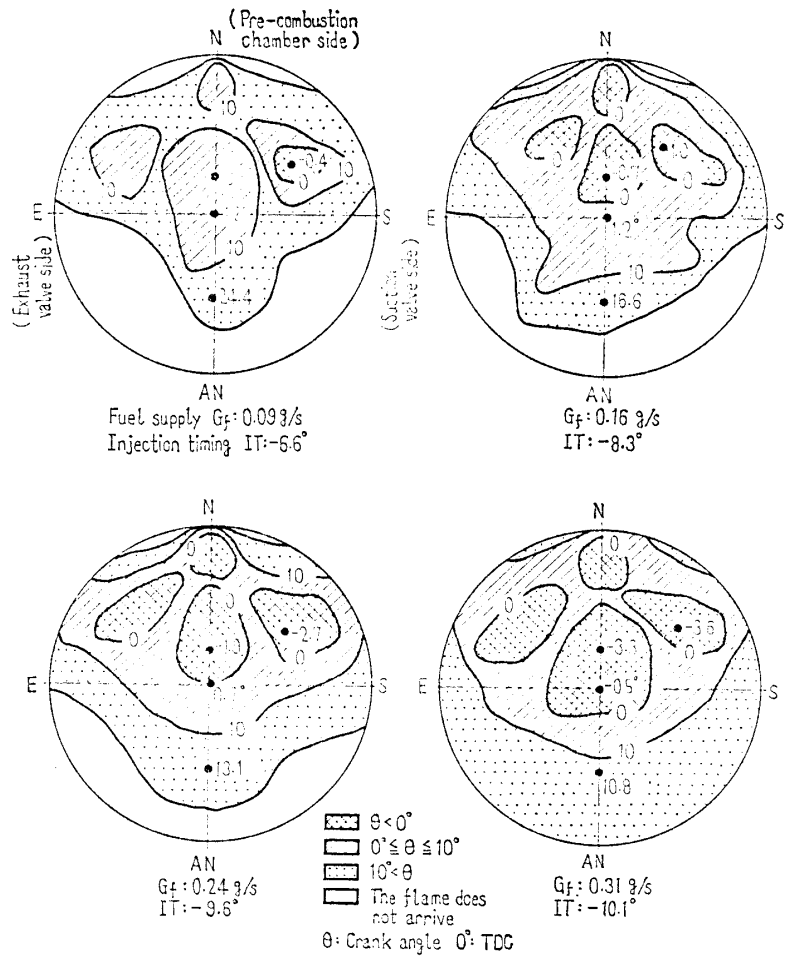


図 18 火炎到達時期分布 (900 rpm)

る。図 17 に 900 rpm における燃料供給量に対する各測定位置の火炎到達時期を示す。火炎の直接当たる地域 (図 6 の A 部) では  $G_f=0.09 \text{ g/s}$  以上において燃料の動的噴射時期 (ニードル弁開時期) より常にクランク角で 7 度程度の遅れで一定しているが、他の位置では規則性はみられない。以上の結果をもとに、図 18 に各燃料供給量におけるピストン表面火炎到達時期分布を示す。 $G_f < 0.24 \text{ g/s}$  では、火炎が到達しない地域があるが、 $G_f$  の増加と共にその面積が減少し、 $G_f=0.31 \text{ g/s}$  ( $\phi=0.695$ ) では、ピストン表面全体に火炎が到達する。しかし反予燃焼室側の外周部での火炎到達時期は火炎の直接当たる場所よりクランク角で 20~50 度遅れている。

以上により、ピストン表面上の火炎到達時期分布を詳細に知ることができたとともに、ピストン表面上の燃焼領域および燃焼ガスの流動が解明された。すなわち、予燃焼室から噴出される混合ガスが衝突する場所では、火炎到達時期が早く、その後火炎はピストン表面上を燃焼を行いながら移動するが、当量比により燃焼領域は異なる。このため、ピストン表面上の熱流束の変化、平均熱流束の場所による違いの原因となると考えられる。

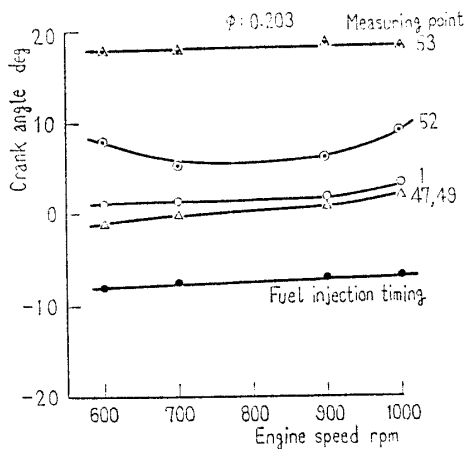


図 19 火炎到達時期 (回転数変化)

4.2.2 回転数の影響 回転数を変化させた時の火炎到達時期を図 19 に示す。各測定位置とも、回転数の増加に伴い火炎到達時期をクランク角度で表すとあまり変化していない。しかし、燃料を噴射してから、測定点に到達する時間は回転数に比例して短くなっていくことになる。

4.3 熱流束と火炎到達時期 火炎到達時期と燃焼ガスによる表面温度上昇始めの時期との関係を図 20, 21 に示す (測定位置番号は図 3 参照)。各条件とも表面温度上昇始めの時期は火炎到達時期よりクランク角で 1~2 度遅れている。また火炎到達時期と平均熱流束の関係を図 22 に示す。各測定位置とも火炎到達時期が早くなると、平均熱流束  $q_m$  が増加している。これは、火炎到達時期の早くなることは、図 17 にみられるように A, B 部では燃料供給量を増加したことであり、結果として平均熱流束が増加する。また燃焼ガスに接している期間が増すとともにその時期の燃焼ガス温度、燃焼圧力、ガス流動、したがって熱伝達率が増加するためと考えられる。しかし、火炎到達時期が上死点前になると平均熱流束は減少している。この傾向がみられる測定位置は予燃焼室からの噴出ガスが衝突する場所であるが、この条件においては、予燃焼室における当量比は 1.0 以上となり、火炎到達時のガス温度が低下するためと考えられる。また火炎が到達しない場所では、燃焼圧力、ガス温度、ガス流動によ

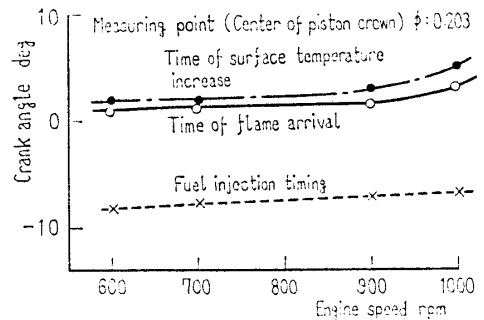


図 21 火炎到達時期と表面温度上昇開始時期

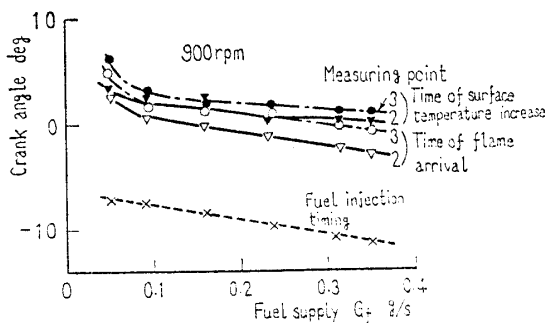


図 20 火炎到達時期と表面温度上昇開始時期

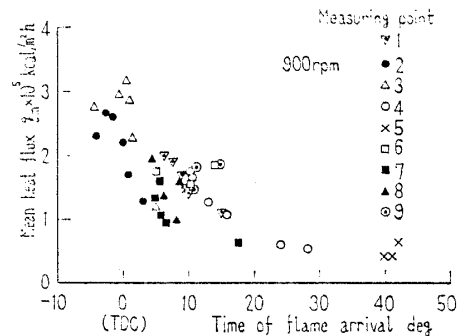


図 22 火炎到達時期と平均熱流束



る影響はなく、ほぼ一定値を示している。

### 5. 結 論

小形熱流量計を製作し、予燃焼室式ディーゼル機関のピストンクラウン部に取付け、熱流束を測定した結果、次のことが明らかになった。

(1) 試作した小形熱流量計は応答性、耐久性、再現性ともほぼ満足できる。

(2) ピストンクラウン各部への取付けが可能となり、各部の熱流束の平均、サイクル変化を求めることができた。

(3) 熱流束のサイクル中の変化、平均熱流束はピストン表面上の場所において、また運転条件により著しく異なる。これは主として予燃焼室噴口からの噴流に関係している。

(4) 平均熱流束は最大熱流束の  $1/10 \sim 1/15$  であり、ピストンへの熱は大部分燃焼を含む膨張行程期間に流入している。

(5) 火炎到達時期分布によると、ピストン表面上の燃焼領域は当量比により異なる。

(6) 熱流束は火炎到達時期と予燃焼室から噴出す

る火炎の燃焼状態とピストン表面上の火炎の動きに関係している。

(7) 試作熱流量計をシリンダヘッド、シリンダライナへ取付け、各部への熱流の測定の可能性が見いだせた。

なお、本研究費の一部は文部省の特定研究「自動車の排気浄化に関する基礎研究」および日本自動車研究所に負い、また実験に際しては、吉橋照夫、戸田富士夫両技官および、宮崎敏行、山口祐弘、滝沢隆行、鳥塚輝男の諸君にご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

### 文 献

- (1) 吉田・針谷, 機講論, No. 760-16 (昭 51-10), 199.
- (2) Seale, W.J. and Taylor, D.H.C., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 185-17/71 (1970-71), 203.
- (3) Le Feuvre, T., ほか2名, *SAE Paper*, No. 690464 (1969).
- (4) Whitehouse, N.D., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 185-72/71 (1970-71), 963.
- (5) 小栗, 内燃機関, 11-127 (昭 47-8), 133.
- (6) Overbye, V.D., *Ph. D. Thesis, Mech. Engr. Dept., Univ. Wisconsin*, (1960).
- (7) 川下, 熱伝導論, (昭 41), 73, オーム社.
- (8) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 (改訂第2版), (昭 41), 254, 日本機械学会.

### 討 論

〔質問〕 小栗 達 (横浜国立大学工学部)

応答性の高い熱流量計を自作され、予燃焼室ディーゼル機関のピストン頂面の熱負荷瞬時値を計測された意義は高いと思う。

(1) 熱流量計の絶縁にセラミック系接着剤を用いたとあるが、熱伝導率は十分に低いものか。セラミックといっても窒化系のものには金属とほぼ同等の熱伝導率のものもあると知らされているのでおたずねする。

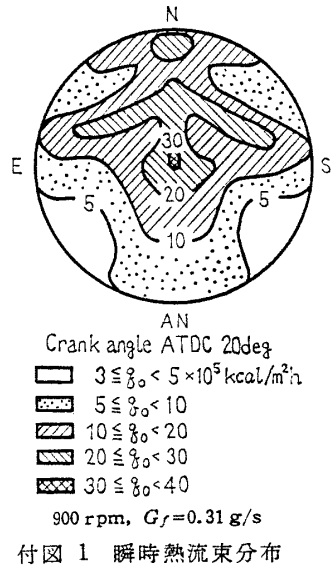
(2) 熱接点導体膜は  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  ということ薄いものだが、Medtherm プロブのように  $1 \mu\text{m}$  程度というものもあり、質問者のシリンダヘッド面での経験では相当長時間の寿命がある。本研究の場合これ以上の寸法低減は困難だったか。

(3) 4.1.1 項, 表面温度変化の項に述べておられるように、サイクルごとの変動がかなりあることと思う。多数サイクルの平均波形を算出しなかったか。

(4) 図 18 の火炎到達時期の分布図に熱流束  $q_0$  のピーク値ないしは  $q_0$  のある値以上の継続期間のような熱流束を示す分布を重ねられないか。図 20, 21 が最良の関係図か。

〔回答〕 (1) 使用したセラミックはシリカ系のもので、熱伝導率は  $0.78 \sim 0.80 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  (東海技研会社, 熱定数測定器による) で、コンスタンタン  $20 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ , Al 合金  $134 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  に比べ十分小さく、4.1.1 項で述べたように深さ  $1.0 \text{ mm}$  以下では  $x_A/x_B = 0.95 \sim 1.06$  の値をとり、この範囲では一次元流れの熱流と考えられる。しかし、表面温度に関しては Al 合金とコンスタンタンの熱伝導率の差により、差を生じることが考えられ、西協氏の質問 (2) に答えておいたが、今後、理論的にも究明したいと考えている。

(2) 著者らは、前に Medtherm probe を使用したが、予燃焼室からの噴流が衝突する場所では熱接点を構成する蒸着膜 (厚さ  $1 \mu\text{m}$  程度) の強度不足によりはがれ、使用できなかった。また、著者らも独自で蒸着膜による熱接点の検討を行ったが、十分な耐久性が得られなかった。そこで今回試作したように銅めっきを用い、その厚さを変えて耐久試験を行った結果、 $5 \mu\text{m}$  以上の厚さで、耐久性の良いことが判明した。しかし、製作上、めっき厚さは  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  となる。また、厚さ  $10 \mu\text{m}$  の場合、表面温度変化 ( $x=0$ ) と熱



接点構成部における温度変化 ( $x=10 \mu\text{m}$ ) の温度振幅比は  $(T_{Wz=10\mu\text{m}})/(T_{Wz=0})=0.995$  (900 rpm, 四サイクル) であり, 熱接点部の温度変化を表面 ( $x=0$ ) の変化として差しつかえないと考えられる。

(3)  $q_m$  を求める著者らの方法によると, 多くのサイクルの平均をとっていることになる。このため,  $q_0$  も多サイクルの平均を用いる必要があり, 著者らはデータレコーダに記録した約 50 サイクルの温度波形から平均的な 1 サイクルの温度変化を取り出し, その場所における代表的な温度経過として,  $q_0$  を求めている。今後は  $q_m$  および温度変化波形もある一つのサイクルについて, 文中の計算を行い, ある測定位置における, 各クランク角ごとの熱流束変動を求めることを考えている。

(4)  $q_0$  は瞬時のガス温度, ガス流動に関係するもので, 局所的にその影響が異なる。火炎到達時期は  $q_0$  の急激な上昇時期に対応する表面温度の上昇時期と良好な関係を示し,  $q_0$  の最大値との関係はみられない。

なお, 各測定位置の  $q_0$  の最大値に近い値をとるとみられる, クランク角 ATDC 20 deg における瞬時熱流束分布 (900 rpm,  $G_f: 0.31 \text{ g/s}$ ) を付図 1 に示す。これは図 18 の右下の図に対応するものである。

〔質問〕 西脇 一 宇 (岡山大学工学部)

ピストンクラウン表面の熱流束と火炎到達との関連性を実証されたご研究に敬服する。

(1) すずたい積物は表面熱流束にどの程度影響するものか。貴実験でお気づきの点があればお教え願いたい。

(2) 試作された熱量計は壁面への熱流束を測定する上に, 一次元熱流束を実現するよう工夫された点が良いと思うが, 一方平均壁温を測定する上では周囲か

らの熱流束をしゃ断しない方が良いと思われる。したがって図 13 の平均表面温度は各熱電対の周辺部表面温度と必ずしも同じでないと考えられるが, ご見解を伺いたい。

(3) 419 ページ右欄 11~13 行めの内容について, 図 9 の表面温度変化の大小と  $G_f$  の大小関係が必ずしも一致していないように見受けられるがいかか。

(4) 図 11 で測定点 6 と 7 および 8 と 9 の熱流束大小関係はピストン周辺部が高く内側が低い傾向を示しており, また図 22 についてもこの傾向がうかがえる。このことは図 18 と対応させて火炎到達時期の観点のみでは反対の傾向のように思われるが, 何かお考えがあればお教え願いたい。

〔回答〕 (1) すずたい積が  $q_0$  に与える影響については, ファイリング時では運転条件に応じてすずがつくので影響を見つけることはできないが, モータリングで影響を検討した結果, 予燃焼室からの噴流が衝突する場所では, 影響が少なく, これから離れたところでは多い (表面温度変化幅はすずたい積のない場合の 50~60% になる)。噴流の当たる所では空気ですずが除去されるからであろう。

(2) 測定点付近の熱の流れが一次元になるよう, セラミックで絶縁していると同時に, 熱流量計材質はコンスタントンでピストン材質は Al 合金と異なるため, 当然平均表面温度は熱電対の周辺部表面温度よりも高くなる。その値に関しては今後検討の要があるが, 実験の途中で真の表面温度に近い値を知るためにクラウン部にセラミック (厚さ 0.1mm) を介して, コンスタントンの細線 0.3 mm を埋め, クラウン表面に Al 蒸着を行ったもので一部実験を行った結果, 全負荷運転条件で, 測定位置 3 で約  $15^\circ\text{C}$ , 5 ではほとんどその差は見られない。この方法は蒸着膜の強度不足と  $q_m$  を求める熱電対取付けが困難のため使用しなかった。

(3) ここでは  $G_f$  の大小と表面温度変化の大小について定性的に説明したもので, 詳細は図 13 に示すように  $G_f$  がある値をこえるとクラウンに衝突する噴流温度が下がり, 表面温度変化幅は低下する。

(4) 本実験に用いた機関の予燃焼室の噴口数は 4 口で, その噴口よりピストン表面に噴流が衝突する場所は図 6 の A 部である。測定位置 7, 8 は主噴口と補助噴口より噴出する噴流の間にあるため, 油膜法による流れ模様の観察(付 1)の結果, この場所は測定位置 6, 9 に比べて噴流の影響を受けない。そのため, 火炎到達時期の差よりガス流動の影響が強いため, 熱流束の値はピストン外周部の方が高くなったと考えられる。

(付 1) 吉田・ほか 2 名, 自動車技術会前刷集, No. 781 (昭 53-5), 335.