スモークワイヤー法による内燃機関 シリンダ内気流の可視化*

浜本嘉輔**・橋本正孝***・大東俊一**

Visualization of Air Flow in Cylinder of Internal Combustion
Engine by means of Smoke-Wire Method

By Yoshisuke Hamamoto, Masataka Hashimoto, Shunichi Ohigashi

By applying a smoke-wire method, the air swirl in the cylinder of the internal combustion engine was visualized successfully in the condition of motoring.

A nichrome wire coated with oil was set up inside the combustion chamber. The oil was vaporized by heating the wire electrically in the fixed instant, and then the oil vapor was cooled by ambient air and the white oil mist (smoke) was formed.

The photographs of smoke were taken by means of a high speed camera, so the flow pattern and the velocity of air were determined.

The fundamental properties of this electrically controlled smoke traces were investigated in steady flow and in the field of acceleration, and then it was found that the technique was possible to apply to the flow visualization and the quantitative measurement of the air swirl in engine.

1. ま え が き

高速ディーゼル機関の燃焼に及ぼす燃焼室内空気流動の影響は非常に重要な問題であり、特に、直接噴射式機関における混合気形成、熱発生、スートの生成、あるいは、窒素酸化物の生成などの諸過程において、空気流動が重要な役割を果たしている。また、自動車用ガソリン機関においても、窒素酸化物の排出量低減のため、排気再循環あるいは希薄混合気燃焼などが行なわれているが、この場合、サイクルごとの燃焼状態の変動が問題となり、この解決のために、燃焼室内混合気流動が有効に利用されている。

往復式内燃機関の燃焼室内ガス流動は、流速の大きさおよび方向が大きく変化し、さらに温度、圧力の急激な変化を伴う非定常流であり、これの測定は最も困難なものの一つで、これの測定法に関しては、今までにも多くの研究がなされている¹⁾。その主なものとしては、熱線流速計を用いる方法、放電法、動圧測定による方法などがあり、また最近では、レーザードップラー流速計を用いる方法²⁾も実用化の段階にきている。

しかしながら、これらの方法は局所的な流速を測定す

るものであり、燃焼室内気流の全ぼうをは握るためには、適当な方法で流れを可視化することが望まれ、火花追跡法^{3~5)}、タフト法⁶⁾、メタアルデヒドをトレーサとする方法^{6,7)}、および油膜法⁸⁾などが駆動運転状態の機関に適用されており、また、発火運転状態の機関燃焼室内気流の可視化例としては、ピストン頂面に反射鏡を取り付け、シュリーレン法により可視化した例⁹⁾、およびピストン頂面に観測窓を設け、その下側から燃焼室内の小火炎片の動きを撮影することにより流れを可視化した例¹⁰⁾などがある。

本研究は、スモークワイヤー法¹¹⁾を応用して、シリンダ内スワールを可視化する方法について検討したものである。シリンダ内に張った抵抗線に適当な油を塗布し、所定のクランク角度において、コンデンサに蓄えられている電荷を抵抗線を通して放電させ、スモーク(オイルミスト)を発生せしめ、これを高速度撮影して、流れを可視化した。シリンダヘッドには吸・排気弁、燃料噴射弁などがついており、視野を大きくとれないので、本実験ではピストン頂面に観測窓を取り付け、その下側よりシリンダ内を観察した。

まず、定常空気流中にて、スモークの移動速度を空気流速と比較し、次に、加速度場におけるスモークの挙動を調べ、駆動運転状態でのシリンダ内スワールの可視化法として使用できることを確かめた。さらに、スモークの動きから流速分布を求め、これらの結果を油膜法によ

* 原稿受付 昭和53年6月28日

昭和53年春季学術講演(昭和53年5月25日)

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

るピストン上面の流れ模様⁸⁾、および放電法による流速測定結果¹⁰⁾と比較検討した。

2. スモークワイヤー法の吟味

内燃機関のシリンダ内流れは、圧縮行程においても、かなり強く乱れており、スモークワイヤー法で可視化するためには、かなり多量のスモークを発生させる必要がある。したがって、抵抗線付近の空気加熱程度も大きくなり、空気の膨張、密度の減少が測定値に及ぼす影響を調査しておく必要がある。そこで、定常流中でのスモークの移動速度と熱線流速計による流速測定値を比較し、次に、静止大気中での自然対流場におけるスモークの上昇速度、および回転容器内の遠心力場におけるスモークの挙動を調査した。

2.1 スモーク発生装置 図1にスモークワイヤー用の放電回路を示す。所定の時期に発生するトリガーパルスにより、ネオン放電管が放電し、その電流によりクセノン放電管が励起され、放電用コンデンサCに蓄えられている電荷が、このクセノン放電管を通して、スモークワイヤーRに流れる。スモークワイヤーには細いニクロム線を2本ないし4本より合わせたものを用い、グリセリンを塗布して使用した。大電流を流した場合、このワイヤーが振動し、塗布した油が飛散してしまうこと

R : スモークワイヤー, C : 放電コンデンサ

図1 放電回路

があるが、より線の場合は単線の場合より、油の保持が良く、常に安定したスモークが得られた。また、トリガーパルスの発生は高速度カメラと同期させてある。定常流であれば、カメラと連動したスイッチング回路で、コンデンサの電荷を放電させれば良いが、本研究の場合には、機関のクランク角度を指定してスモークを発生させる必要があり、図1のような回路を用いた。なお、この回路において、スイッチオンからスモーク発生までの時間遅れは約2msであり、あらかじめその遅れ分だけトリガーパルスの発生点を進ませておけば、所期の位置でスモークを発生できる。

2.2 定常流実験 図2は38mm×45mmの矩形断面ダクト内の定常空気流をスモークワイヤー法にて可視化した例である。直径0.13mmのニクロム線を2本よ

図3 定常空気流中のスモーク移動速度

図2 スモークワイヤー法による定常空気流の可視化例

り合わせ, ダクト内に水平に張り, 発生させたスモークを横から照明し, 上から高速度カメラにて撮影した. ニクロム線の抵抗値は 1.9Ω で, 放電コンデンサの容量は $250\mu\text{F}$, 充電電圧は 250V である. 流れの中央部におけるスモーク先端の移動速度を求め, 熱線流速計にて測定した空気流速に対してプロットした結果を図3に示す. スモークの移動速度はスモーク発生より約 30ms までの間の平均速度である. 両者の間には大きな差はなく, 測定範囲内で, スモーク移動速度の方が流速より約 0.3m/s 程度大きな値を示しているに過ぎない. この実験で, コンデンサの容量を $100\mu\text{F}$ から $250\mu\text{F}$ まで変えたが, その影響はほとんど認められなかった.

2.3 加速度の影響 スモークの運動に及ぼす加速度の影響を調べるため, 図4に示すような回転容器内にてスモークを発生させ, その挙動を観測した. スモークワイヤーは直径 0.17mm のニクロム線を4本より合わせたもので, 長さは約 78mm , 電気抵抗は 1.5Ω であり, 図のように容器内に取り付けた. 放電コンデンサ容量は $500\mu\text{F}$, $1,000\mu\text{F}$ および $1,500\mu\text{F}$ の3種類で, 充電電圧は常に 250V である. 容器を一定角速度 ω で回転させておき, スモークを発生させ, それを横から照明して, 上から高速度撮影した. その例を図5に示す. これはワイヤーにより加熱された空気塊が, 加速度の影響を受けて容器中心に向かって移動し, それに伴ってスモーク(オイルミスト)も動いていくものと考えられる.

このスモーク先端の中心へ向う速度 v は, スモーク発生初期, および容器中心部へ集まった時を除いて, ほぼ一定であった.

これと同様な実験が, 火花追跡法における加速度の影

響を調べた長尾らの研究⁴⁾においても行なわれており, 近似的には次のように考えることができる.

回転中心から距離 r のところの加熱された空気塊(密度 ρ , 体積 V) が回転中心に向かって速度 v で動くとき, 運動の方程式は次のようになる.

図4 回転容器

図5 回転容器中のスモークの挙動

$$-\rho V \frac{dv}{dt} = \rho V r \omega^2 - \rho_0 V r \omega^2 + k v^\beta$$

ここで、 ρ_0 は加熱されていない空気密度であり、加熱された空気塊は v^β に比例する抵抗を受けるものとする。なお、 k 、 β は定数である。

この式で、 v が一定になった状態では、

$$v = \left\{ \frac{\rho_0 V}{k} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) r \omega^2 \right\}^{1/\beta}$$

とあらわされ、ここで、加速度 $r \omega^2 = A$ とおけば、
 $v \propto A^{1/\beta}$

となる。図6も回転中心へ向かうこの速度 v に及ぼす加速度 A の影響を調べた結果である。ただし、加速度 A を重力加速度 g によって無次元化してある。また、速度 v のデータは、スモークワイヤーの中央部約24mmから発生したスモークが、中心より30mmの位置から15mmの位置までを移動したときの測定値を、各位置、各時間ごとに平均化したものである。図6において $A = g$ のときの v の値は、静止大気中での自然対流場におけるスモークの上昇速度の平均値である。

図6 スモークの挙動に及ぼす加速度の影響

図6の結果から $\beta \approx 1.8$ となり、

$$v = 0.08 (A/g)^{0.55}$$

とあらわされる。

3. スモークワイヤー法によるシリンダ内スワールの可視化

実験装置の概略を図7に示す。シリンダ径125mm、ストローク110mmの単シリンダ直接噴射式四サイクルディーゼル機関であり、実際のピストンの上に、頂面に観察窓をもった長いピストンを取り付け、その下部よりシリンダ内を広く観察できるようにしてある。スモークワイヤーは、直径0.17mmのニクロム線を4本より合わせたもの（電気抵抗2.4Ω）であり、シリンダヘッド下面より約14mm下方の位置に、ほぼシリンダ直径方向に張っており、吸・排気弁に接解しないようになってい

図7 実験装置

る。なお、この部分のシリンダ（厚さ15mm）は透明にしてあり、スモークを横から照明し、ピストン下方から反射鏡をとおして、高速度カメラにて撮影した。

吸入弁にはシュラウドが取り付けられており、シュラウド取付位置 α を変えることにより、スワールの強さを変えることができる。また、シリンダヘッド下面もピストン頂面も平面であり、圧縮、膨張行程におけるシリンダ内の主な流れはスワールである。

スモークワイヤー法によるスワールの可視化例を図8に示す。機関回転速度 $n = 900 \text{ rpm}$ で、シュラウド取付位置 $\alpha = 30^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ の場合の圧縮行程中のスワールである。 $\alpha = 30^\circ$ ではスワールはピストン側からみて右方向に比較的整然と流れており、 $\alpha = 240^\circ$ ではスワール方向が逆になっている。また、 $\alpha = 120^\circ$ では、シリンダ軸を中心とした旋回流はみられず、この場合は多分、吸入行程でのたて方向の流れがいくらか残っているのではないかとと思われる。

このようなスモーク先端のトレースを重ね合わせた図、およびスモーク先端の特徴ある点を結んだ流脈図を図9に示す。また、同図にはピストン上面の境界層内流れを油膜法により可視化した例⁸⁾も示してある。

このような結果から、圧縮行程におけるシリンダ内の大まかな流れの様子を理解することができる。すなわち、

(機関回転速度 $n=900\text{rpm}$, 放電: $250\text{V}-1500\mu\text{F}$)
 θ : クランク回転角度, α : 吸入弁シュラウド位置

図8 スモールワイヤー法によるシリンダ内スワールの可視化例

図9 シリンダ内のフローパターン

シュラウド取付位置 $\alpha = 330^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲では、ピストン側からみて右方向の旋回流が発生し、比較的剛体渦に近いような速度成分をもって旋回している。一方、 $\alpha = 150^{\circ} \sim 270^{\circ}$ では旋回方向が逆転している。また、 α の値が 120° 前後、および 300° 前後においては、はっきりとした旋回流はみられない。このように、吸気弁のシュラウド取付位置 α を変えると、フローパターンは大きく変化するが、機関回転速度が変化してもフローパターンはあまり変化しない。図10は、スモークの特徴ある点の一定期間 (BTDC $80^{\circ} \sim 30^{\circ}$) におけるシリンダ中心軸に対する回転角速度を流速 U に直してプロットした例であ

る。 r はシリンダ軸からの距離である。このように、 $\alpha = 30^{\circ}$ 付近の場合、剛体渦に近い速度分布をもった流れが得られるが、この場合でも、吸入終りあるいは圧縮始めの時期には、シリンダヘッド近く (測定場所) における流れは旋回流を形成しておらず、圧縮行程中にだんだんと旋回流になり、さらに、圧縮行程後期から膨張行程にかけて、シリンダ軸を中心とする旋回流となっていくことがわかった。

次に、このような速度分布をもつ旋回流と角運動量の等しい剛体渦の回転速度の機関回転速度に対する比を求め、スワール比 SR として図11に示した。図中には放電

図 10 スワール速度

図 11 吸入弁シュラウド取付位置 α によるスワール比 SR の変化

法による測定結果¹⁰⁾も示してあるが、再者は大体一致している。

なお、スモークワイヤー法の問題点としては、ふん囲気が高温になった場合に、スモークが消滅することがあげられる。圧縮比を変えて調べてみると、約 140℃ 程度以上になると消滅しており、膨張行程で温度が降下すると再びスモークが現れる。このスモーク消滅の温度 140℃ という値は、N. Kasagi ら¹²⁾の示している値 (400°K) にほぼ等しくなっている。

4. あとがき

流れの可視化法の一つであるスモークワイヤー法について検討し、これを用いて内燃機関のシリンダ内スワールを可視化することができた。これは非常に簡単な方法であるが、流れの定性的観察のみならず、定量的計測も可能であることがわかった。

終りに、本研究の一部は昭和 52 年度文部省科学研究費の助成を受けて行なわれたことを付記し、謝意を表します。

文 献

- 1) 浜本：内燃機関，11-127 (1972-8, 臨時増刊) 116
- 2) 浅沼，小保方：日本機械学会第 426 回講習会教材 (内燃機関の新しい計測法)，(昭 51-3)，45
- 3) Nakajima, K., Kajiya, S., and Nagao, F., 12th Congress of FISITA (1968), 1-02
- 4) 長尾，池上，三輪，他 3 名：日本機械学会論文集 37-296 (昭 46-4)，797
- 5) 浅沼，小保方：日本自動車研究所速報第 2 号，(昭 46-9)，97
- 6) 徐，徐：自動車技術会論文集 No. 2 (1971-7) 22
- 7) 井本：内燃機関，13-146 (1974-1)，11
- 8) 浜本，柴垣：自動車技術会論文集 No. 16 (1978-9)，掲載予定
- 9) Huber, E. W., Stock, D. and Pischinger, F., MTZ. 32-9 (1971-9), 313
- 10) 田辺，浜本，大東：日本機械学会論文集 43-370 (昭 52-6)，2307
- 11) 浅沼：流れの可視化ハンドブック，(昭 52) 300，朝倉書店
- 12) Kasagi, N., Hirata, M. and Yokobori, S., Proceedings of the International Symposium on Flow Visualization (1977-10), 169