



線に平行な直径線上の3点(I:吸気弁側, II:中心, III:排気弁側)であり,ピストン面に平行なスキュー流の分速を測定することができる。この場合,シリンダから弁部への流れを正とし,また,流れと燃焼との対応をみる目的からシリンダヘッドの点火プラグと指圧計の線上に4個のイオンプラグが取付けてある。

**2.2 レーザ・ドップラー流速計(LDV)** この詳細についてはすでに解説がある<sup>(3)(4)</sup>ので,ここでは簡単にのべる。可干渉性の2本のレーザ光線( $\vec{k}_{i1}, \vec{k}_{i2}$ )を交差角  $2\theta$  で交差させると,図2に示すように,交差部の測定体積には, $2\theta$  の二等分線に平行に干渉縞を生ずる。いまこの干渉縞(その間隔を  $S$  とする)の中を微粒子  $P$  が速度  $\vec{V}_p$  で通過するとき生ずる散乱光  $\vec{k}_s$  の明暗の周波数がドップラー周波数  $f_D$  で,次式で与えられる。

$$f_D = \vec{V}_p \cos \varphi / S = (2n/\lambda_0) V_p \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

式から明らかのように,干渉縞に直角な粒子速度成分 ( $V_p \cos \varphi$ ) は  $f_D$  に比例している。ここに  $n$ :流体の屈折率,  $\lambda_0$ :真空中における光線の波長である。

使用した LDV の光学系は干渉縞方式 (fringe mode または two beam mode) の前方散乱光を検出するもので,図3にはその光源部と受光部が示して

ある。5 MW の He-Ne ガスレーザ管からのレーザ光をケスタープリズムで分割し,流れの向きを弁別するために周波数シフタ (DISA 社製 55 L02) によって両光線の周波数をずらしている。このことは図2の干渉縞を空間的に移動させることになり,移動周波数の範囲内で正負の流速を測定することができる。この際,移動周波数を高くすると周波数シフタ後の両レーザ光線が紙面に垂直方向に曲げられ,一点に交差しなくなるので,新しく用意したプリズムで調整するようにしてある。以上が光源部である。

つぎに粒子からの散乱光は受光部の集光レンズ,  $50 \mu\text{m}$  のピンホールを経て光電子増倍管に入り検出される。そのドップラー信号の電圧変換はオートダイナミック方式<sup>(5)</sup>の周波数トラッカ (CPS 社製) で行い,速度をアナログ出力として記録することができる。使用したトラッカの処理周波数は  $70 \text{ Hz} \sim 14 \text{ MHz}$  であり,5レンジに分割され,各レンジの作動範囲は  $20:1$  と比較的狭いが,粒子の供給が連続的でなく雑音の多いシリンダ内の変動流などを実時間測定するには優れている。またその最大応答周波数は,平均流速  $100 \text{ m/s}$  のとき流速変動分を  $10\%$  とすると  $80 \text{ kHz}$  に相当する<sup>(3)</sup>。

**3. 実験条件および実験方法**

**3.1 レーザ光線の交差角** 2本の入射光線の交差角  $2\theta$  により構成される測定体積を小さくして空間分解能を上げ,測定体積内の干渉縞数を多くして測定精度を向上させるためには交差角を大きくしなければならない。他方,機関に設ける測定窓を小さくし,検出周波数  $f_D$  が過大になるのを避けるためには逆に  $\theta$  を小さくしたい。ここではこれらを考慮して  $2\theta = 3.75^\circ$  としたため測定体積の長さは約  $10 \text{ mm}$  と比較的大きい。

**3.2 散乱用粒子の選定** LDV においては流体中に浮遊する散乱用粒子の速度を測定することになるので,粒子の流れに対する追従性が問題となる。一般に空気流の乱れを測定するためには,粒子径  $1 \mu\text{m}$  以下,できれば  $0.2 \mu\text{m}$  程度がよいと言われている<sup>(6)(7)</sup>。しかし粒子径が小さくなると,散乱光も弱くなるので,使用する光源を考慮して,またシリンダ内のように雑音の多い場所で  $S/N$  比をある程度大きくするためにも,適当な大きさの粒子を選定する必要がある。また内燃機関におけるシリンダ内の流れを対象とする場合には,散乱用粒子は,まず

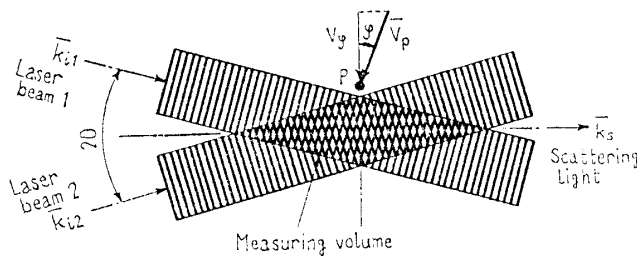


図2 LDVの測定原理説明図

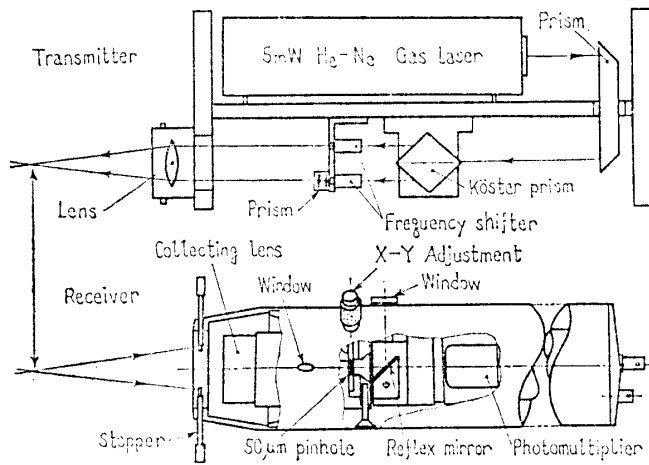


図3 使用したLDVの光源部と受光部

観測窓を汚さないこと、燃焼に影響を与えないこと、また燃焼によって消滅しないことなどが重要である。これらの点を勘案しながら、種々試用した結果<sup>(3)</sup>、本実験では、試験用ダスト 8 種 (JIS Z 8901) の関東ローム層粉 (実測によると粒子径は  $\approx 2 \mu\text{m}$ ) を選定することにした。この粒子の変動流への追従性は、たとえば粒子に球のストークスの抵抗係数を仮定して計算すると<sup>(9)</sup>、振幅 10% 減の応答周波数で 2 kHz 程度である。

**3.3 散乱用粒子の供給法** LDV では測定体積内を粒子が通過する時に得られる一連のドップラー信号から一つの速度の値が得られる。しかるに粒子の通過は通常間欠的なので、変動流を折れ線で近似することになる。したがって変動流の実時間測定にあたっては、散乱用粒子を流体に均一に分布させるべく、その供給は連続的に、しかも均一に行い、可能なかぎり連続したドップラー信号を得るようにしなければならない。図 4 は本実験に用いた粒子供給法を示すもので、駆動運転の場合は閉回路として使用する。その際、粒子の供給状況からみて最大応答周波数は 30 kHz 前後と推定される<sup>(3)</sup>。

**3.4 実験方法** シリンダ内のスキッシュ流を、単一圧縮、駆動運転および発火運転の三つの場合につき実時間測定する。一般の駆動運転では圧縮行程に入っ

ても、吸込み行程での流れが残留するので、この影響を除き、最も基本的なスキッシュ流を得る目的から、ピストンを吸込み下死点におき、図 4 に示すはずみ車付き電磁クラッチの接続により駆動運転を開始して、最初の圧縮・膨張行程のみに注目するものを単一圧縮の実験と呼ぶ。またこれに引き続くサイクルは駆動運転の場合に相当する。

次に家庭用プロパンガスを燃料とし、点火時期を上死点前  $25^\circ$  に固定した発火運転の場合、燃焼火炎からのふく射によりドップラー信号の  $S/N$  比が多少劣化するが、火炎ふく射強度の変動がドップラー信号の周波数に近くない限り、流速測定にほとんど支障はない。ただ、燃焼によるガスの圧力、温度および成分の変化により、ガスの屈折率も当然変わるはずである。その変化量は成分の変化に基づくものは約 0.01% であり、圧力と温度変化に基づくものは屈折率と密度の関係を示す Gladstone-Dale の式<sup>(9)</sup>によると、シリンダ内のガス温度  $1000^\circ\text{C}$ 、圧力  $100 \text{ kg/cm}^2$  としたときでも 1% 以下にすぎないので、ここでは無視することにする。なお、屈折率の変化による光路の曲りは、精確な光軸調整を必要とする参照光方式の光学系では無視できないであろう。発火運転にあたり、最も困難な問題は測定窓の汚れである。LDV では周波数を測定するため多少の窓の汚れは差しつかえないが、発火運転の初期には、測定窓に水滴が付着し、計測不能になることがあるので窓ガラスの温度上昇を待って測定を開始するよう配慮した。

#### 4. 実験結果およびその考察

**4.1 単一圧縮の場合** 機関回転数  $N \approx 50 \sim 640 \text{ rpm}$ 、各測定点 (図 1 の I ~ III) において単一圧縮の実験を行い、スキッシュ流を実測し、その代表例が図 5 に示してある。なお、ここでの  $N$  は上死点前  $30^\circ$  のクランク角の回転時間より求める。各オシログラフは上から  $6^\circ$  おきのクランク角パルス、

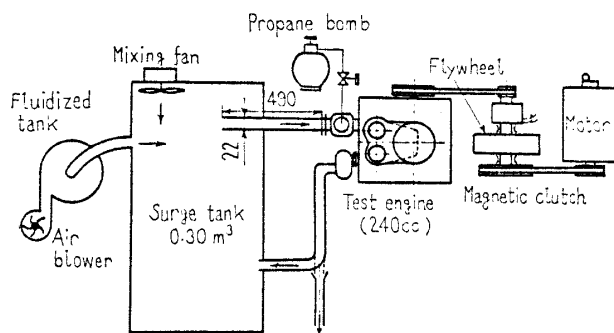
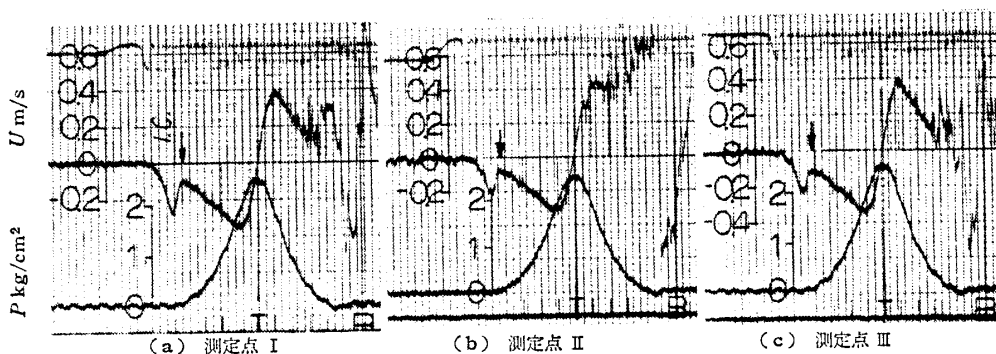


図 4 散乱用粒子の供給法



$N \approx 200 \text{ rpm}$ 、矢印は吸気弁全閉を示す

図 5 単一圧縮実測例

LDV の流速出力 (ただし測定例の流速の正負は図 1 と逆), シリンダ内圧力および圧縮上死点信号であり, T は上死点, B は下死点の位置を示している.

図において圧縮を始めるとすぐに流速線上に一つのピークが認められるが, これは吸気弁が下死点後なお 53° 開いているので, シリンダからの流出があるためである. しかし, その量はわずかな上, 下死点直後に限られている. 吸気弁が全閉した後は本来のスキッシュ流となり, ほぼ上死点で流れは逆転し, 逆スキッシュ流が発生している. 中央測定点 II [図 5(b)] における逆スキッシュ流は一度最高値を示した後, 再び増大している. この傾向は他の測定点 I (a), III (c) でもやや遅れて現れている.

図 6 には, 圧縮上死点前後 90° 間の各測定点におけるスキッシュ流速  $U_s$  を平均ピストン速度  $U_{pm}$  で無次元化したものが示してある. いまシリンダ中心線と測定点 (I ~ III) を含む中央断面より左側をスキッシュ容積  $V_s$  (その断面積をスキッシュ面積:  $A_s$ ), 右側を燃焼室容積  $V_c$  に分け, ピストンの移動による両容積変化率が等しいとの仮定のもとに, この中央断面を横切る準静的な流れを次式により求めることができる<sup>(10)</sup>.

$$U_s = \frac{A_P}{2A_N} \frac{1 - V_s/V_c}{1 + V_s/V_c} U_P \dots\dots\dots(2)$$

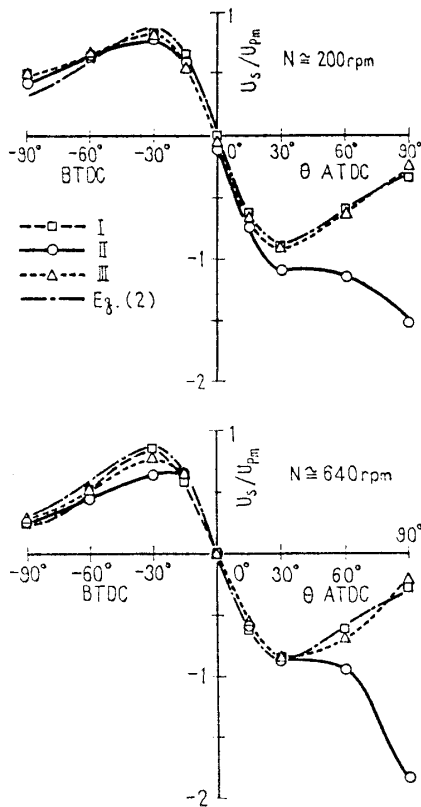


図 6 上死点付近の流れ (単一圧縮)

ここでスキッシュ面積  $A_s$  はピストン面積  $A_P$  の 1/2 とし, スキッシュの吹出す中央断面の面積  $A_N$  はスキッシュ壁面とピストン表面との距離  $X$  とピストン直径  $D$  との積とし,  $U_P$  は各クランク角におけるピストン速度である. 図 6 には式 (2) から求めた準静的なスキッシュ流の値が鎖線で示してある. 図によれば, 単一圧縮のスキッシュ流は回転数や測定位置のいかにかわからず, 準静的な流速とよい相似を示している. ただ測定点 II における逆スキッシュ流は膨張行程の途中からかなり大きな流速を示しているが, これは主として縦方向の旋回流のためと推測される.

中央測定点 (II) におけるスキッシュ流速の最大値  $U_{smax}$  とその位相角  $\theta$  の回転数に対する関係が図 7 に示してある. スキッシュ流の最大流速値は, 図に鎖線で示す準静的なスキッシュ流速の最大値に比べ約 90% 程度であり, 機関回転数によりほとんど変化しない. また最大値を示す位相は, 準静的な値 ( $-31^\circ$ ) とほぼ同じであるが, 高速になるにつれ遅れ, 上死点に近い. これに対し, 膨張行程の初めに生ずる逆スキッシュ流の最大流速は, 準静的な最大値の 1.4 倍から 1.2 倍へと回転数とともに低下し, その位相も遅れ, 上死点より離れる傾向を示している. なお, 放電による流速測定法を用いた報告によると, スキッシュ流速に比べ逆スキッシュ流速の方が大きく, とくにガスもれがあるときはその差がさらに大きくなるといわれているが<sup>(11)</sup>, LDV の測定結果と同じ傾向を示していることになる.

4.2 駆動運転の場合 つぎに機関平均回転数  $N \approx 50 \sim 1300$  rpm の駆動運転における各測定位置の

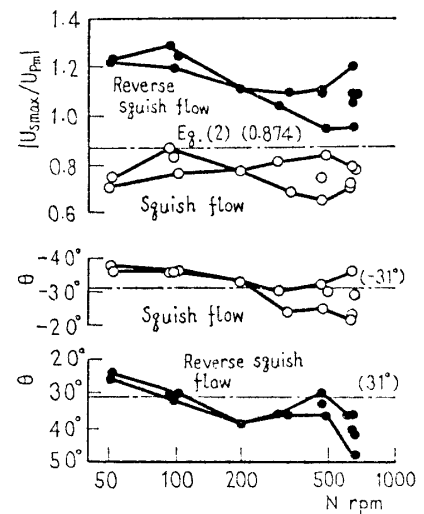


図 7 スキッシュ流速の最大値と位相 (単一圧縮)

スキッシュ流速を実測し、それらの代表例を図 8 に示す。図において、吸入上死点 T からの流入速度は途中、最大流速（吸込み最大流速という）に達し、吸込み下死点 B を過ぎ圧縮行程の 2/3 程度まで継続している。このことからシリンダの縦断面内に旋回流が発生し、吸入行程を過ぎて圧縮行程まで持続しているものと推測される。ついで圧縮上死点 T 前でスキッシュ流、後で逆スキッシュ流が発生し、膨張行程末期で、排気弁が開くとシリンダ内が負圧になっているため、シリンダ内への急激な流入と、これに続く縦断面内の旋回流の生成が認められる。これらの流れは煙を用いて可視化した高速度写真により確認してある。さらに排気行程では排出流と、排気上死点 T 前後におけるスキッシュ流と逆スキッシュ流も観察される。

測定点 II におけるスキッシュ流と逆スキッシュ流の最大値  $U_{max}$  を機関回転数に対してプロットしたものが図 9 である。図には実測値のちらばりの範囲（縦線）とその平均値（○、△ 印）が示してあり、スキッシュ流と逆スキッシュ流の大きさがほぼ等しく回転数に正比例している。図には参考のため単一圧縮の場合の値が比較してあるが、その逆スキッシュ流の値とはよく一致していることがわかる。またこれらの各流速の最大値を生ずるクランク角  $\theta$  が図の下方に示してある。スキッシュ流の位相はほぼ一定 ( $\theta = -20^\circ \sim -30^\circ$ ) とみなしてよいが、逆スキッシュ流のそれは高速になるにともない、かなり遅れていることがわかる。

図 10 には代表的な回転数における各測定点で実測した流速の、各クランク角ごとの平均値が比較してある。スキッシュ流は吸入時の流れの影響を受け、単一

圧縮のそれとかなり異なり、流れが上死点側にかたより、最大値も準静的な値（鎖線）に比べ大きい。また、逆スキッシュ流も最大値はかなり大きく位相も相当遅れている。各測定点による違いは、スキッシュ流の最大流速が中央 II でいちばん大きいことは両回転数ともそろっているが、スキッシュ流に重畳するシリンダ軸中心の旋回流やその他の傾向は各回転数で異なっている。

4.3 発火運転の場合 機関回転数  $N \cong 200, 300$  および 500 rpm の発火運転における各測定点のスキッシュ流速を実測し、それらの代表例を図 11 に示す。

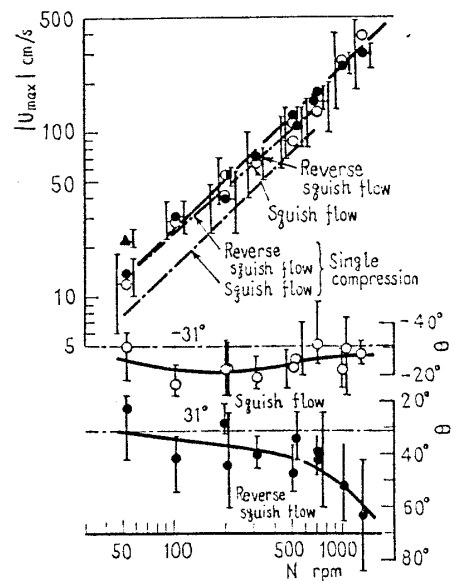


図 9 スキッシュ流速の最大値と位相（駆動運転）

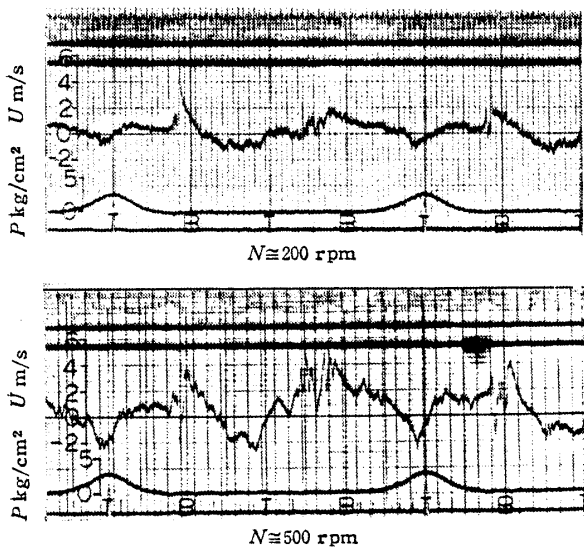


図 8 駆動運転における測定例（測定点 II）

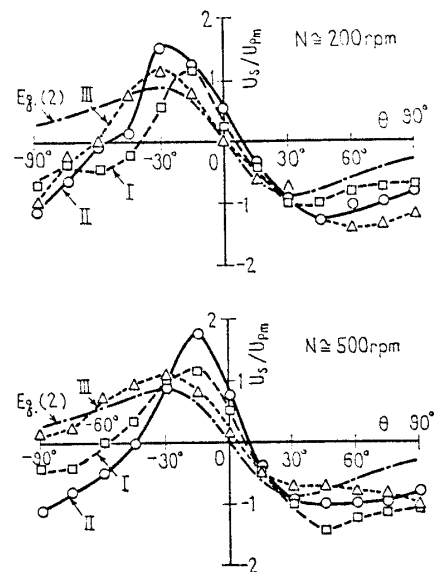


図 10 上死点付近の流れ（駆動運転）

なお各オシログラフには、図5の単一圧縮の場合のほか、クラック角パルスの下にイオンプラグ2と3のイオン電流の信号が記録してある。

吸入行程から圧縮行程の前半までは駆動運転の場合とまったく同じ流速を示しているが、点火後は燃焼に

よる圧力上昇のためスキッシュ流は減速され、逆スキッシュ流が助長される。このスキッシュ領域への吹き込み流の最大値を示すクラック角はイオンプラグ2の火炎信号とよく符号している。つづいてスキッシュ領域内で燃焼が始まると、ここから燃焼室の吸・排気弁方向へのいわゆる噴出流が生ずる。このことはまたイオンプラグ3の信号により確認されている。膨張行程後半になり、排気弁が開く( $\theta = 126^\circ$ )と排気弁方向への顕著な流れが現れ、つづいて排気行程の流れとなるが、これらの排出流れは測定点I(吸気弁側)では弱く、II(中心)では強く、III(排気弁側)で最も激しいことがわかる。

つぎに、機関の回転数を変えながら実測した流速の最大値とその位相角を図12に示す。スキッシュ流に比べスキッシュ領域への吹き込み流である逆スキッシュ流ははるかに大きく、その値は吸込み最大流速とほぼ同じ程度である。また、発火運転に特有なスキッシュ領域内の燃焼による噴出流も逆スキッシュの吹き込み流と同程度でかなり大きい。図(b)にはイオンプラグ(2, 3)に火炎が到着する位相が逆スキッシュや噴出流の最大値の位相と相関関係にあることが示されている。

図13には、各測定点(I~III)で各クラック角ごとに測定した流速の平均値が比較してある(ただし、実測値と符号は逆である)。図10に示した駆動運転時の流速と比べかなり様相が異なっており、その差は主として燃焼に基づく流れによるものである。なかでも測定点IIの流速が燃焼の影響を最も大きく受けている。

燃焼に基づく流れであるならば、圧力上昇  $dp/dt$  となんらかの相関があるものと考えられる。よってまず燃焼時に実測した逆スキッシュ流の最大流速から、同じクラック角における駆動運転の逆スキッシュ流速を差し引いたものを、燃焼だけにに基づく圧力上昇による吹き込み流  $U_J$  とし、これと駆動および発火運転時の指圧線図から準静的に求めた燃焼による吹き込み流の計算値  $U_{JP}^{(10)}$  との比を圧力上昇  $dp/dt$  についてプロットしたものが図14である。もし燃焼に基づく圧力上昇による流れが準静的であるならば、 $U_J/U_{JP}$  は一定値を示すはずであるが、図によると機関回転数や燃焼状態(失火の有無)とは無関係に  $dp/dt$  に対し、ほぼ直線的に低下している。これは  $U_J$ ,  $U_{JP}$  とともに  $dp/dt$  の増加とともに大きくなるが、 $U_{JP}$  の増加割合ほど  $U_J$  の増加割合が大きくないためである。そ

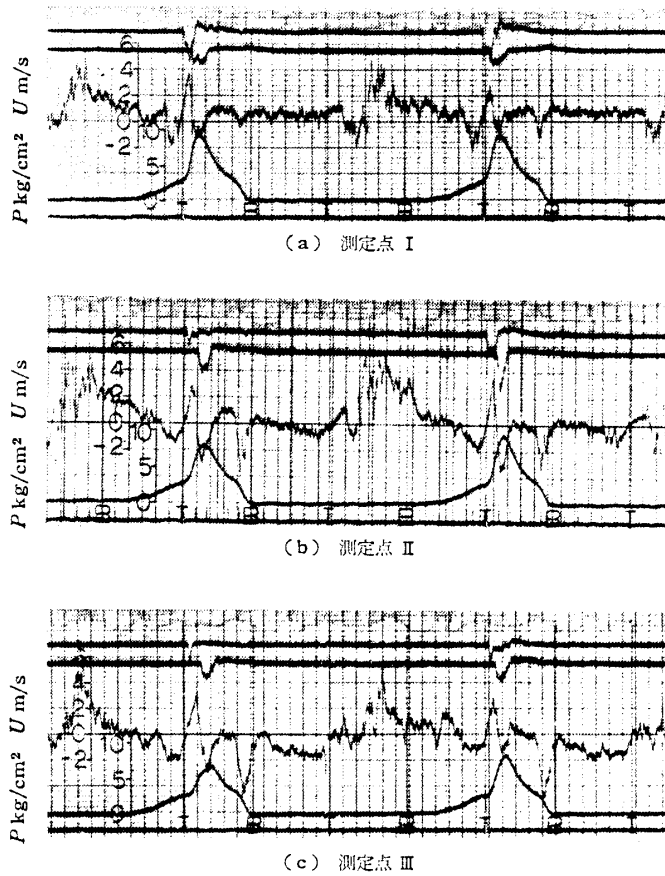


図11 発火運転における測定例 ( $N \cong 500$  rpm)

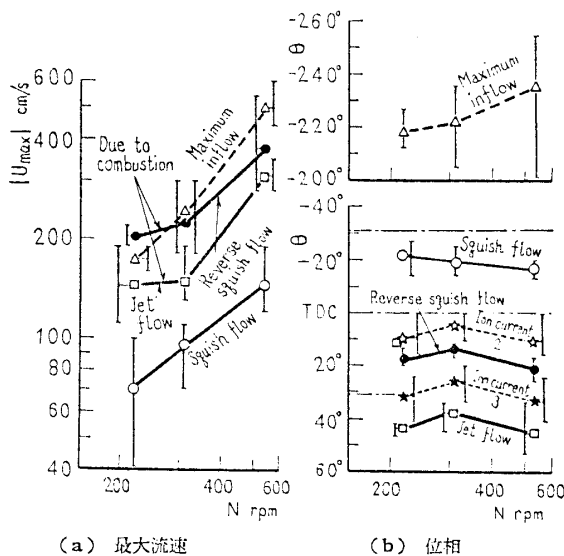


図12 スキッシュ流速の最大値と位相(発火運転)

の結果、完全に準静的であるとはいえないけれど、実測した流速  $U_f$  が一応燃焼に基づくものであるとの推測は間違っていないようである。

## 5. 結 論

レーザ・ドップラー流速計 (LDV) を用いて、単一圧縮、駆動および発火運転におけるシリンダ内ガス流動を実時間測定した。その結果、火花点火機関におけるシリンダ内ガス流動の解析に対し、有力な情報を提供し得ることがわかった。

まず、レーザ・ドップラー流速計をシリンダ内ガス流速の実時間測定に用いるための実験条件として次のことが明らかとなった。

(1) 流速の連続測定には散乱用粒子の連続した均一な供給が不可欠であり、十分大きなサージタンクなどが有効であった。

(2) 散乱用粒子としては JIS 試験用ダスト 8 種

が測定窓の汚れが少なく、また光源の強さとのかねあいからも、信号の  $S/N$  比が比較的良かった。

(3) 発火運転時の測定窓の汚れを防ぐには、あらかじめ窓ガラスの温度を上げることが極めて効果的であった。

つぎに、供試機関のシリンダ内スキッシュ流の流速を測定した結果、次のことがわかった。

(1) 単一圧縮の場合、スキッシュ流、逆スキッシュ流はシリンダ内の容積変化率より求めた準静的な流れと、中央測定点 II の一部を除きよく一致した。スキッシュ流の大きさは準静的な値とほぼ同程度で機関回転数に正比例している。逆スキッシュ流の大きさは、準静的な値よりわずかに大きい程度である。

(2) 駆動運転の場合、吸込み行程における最大流速、スキッシュ流および逆スキッシュ流は、回転数 ( $N \approx 50 \sim 1300$  rpm) にほぼ比例する。スキッシュ流は準静的な値より大きく、吸込み行程の流速の影響が残るため、流速の時間経過のパターンはかなり変形し、上死点側にずれる。また逆スキッシュ流はスキッシュ流とほぼ同じ大きさで、そのパターンは位相遅れの方に変形している。

(3) 発火運転の場合、発火による圧力上昇のためスキッシュ流が途中で打ち切れ、スキッシュ領域への吹き込み流 (逆スキッシュ流) を生じ、ついでスキッシュ領域で燃焼が始まると、再び吸・排気弁部への噴出流が生じ、これらの流速はスキッシュ流に比べはるかに大きく駆動時の 3~4 倍であった。また指圧線図より求めた吹き込み速度に対する実測した流速の比は、燃焼状態 (たとえば失火の有無) などに無関係に圧力上昇率  $dp/dt$  と直線関係にあり、吹き込み速度が燃焼に基づくことが確認された。

最後に、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」に負い、実験にあたっては研究生の大高昭彦君をはじめ本田技術研究所や株式会社友栄の方々のご助力をいただいた。記して感謝の意を表したい。

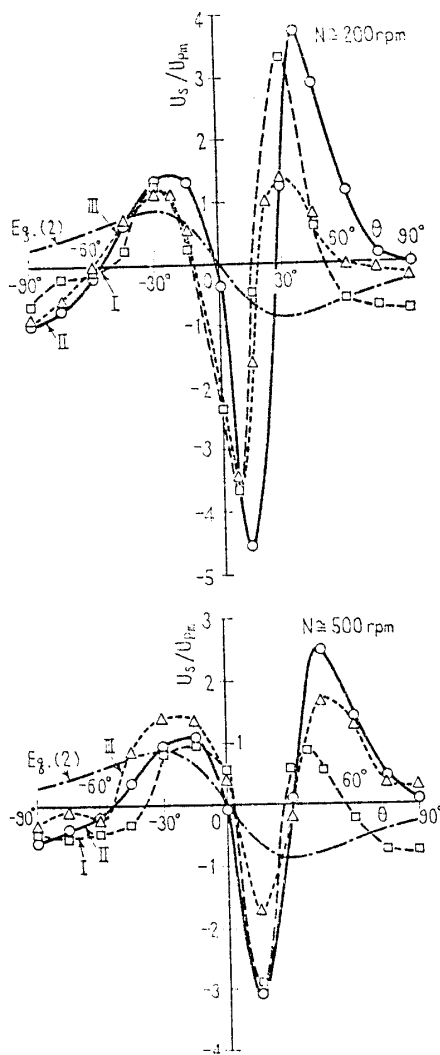


図 13 上死点付近の流れ (発火運転)

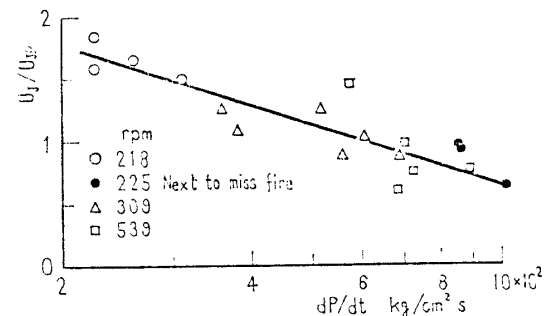


図 14 スキッシュ領域への吹き込み速度  $U_f$  と圧力上昇率  $dp/dt$  の関係

## 文 献

- (1) Yeh, Y. and Cummins, H.Z., *Appl. Phys. Lett.*, 4-10 (1964-5), 176.
- (2) Trolinger, J.D., ほか3名, *SAE Paper*, No. 740125 (1974).
- (3) 浅沼・小保方, 機潤教(第425回), (昭51-3), 45.
- (4) 小橋, 機誌, 77-664 (昭49-3), 297.
- (5) Durrani, T.S., ほか2名, *Opto-Electronics*, 5-1 (1973-1), 71.
- (6) Mazumder, M.K. and Kirsch, K.J., *Appl. Opt.*, 14-4 (1975-4), 894.
- (7) Melling, A. and Whitelaw, J.H., *DISA Information*, No.15 (1973), 5.
- (8) Hjelmfelt, A.T., Jr. and Mockros, L.F., *Appl. Sci. Res.*, 16 (1966), 149.
- (9) 浅沼, 流れの可視化ハンドブック, (昭52), 317, 朝倉書店.
- (10) 平尾, 自動車用機関計画原論, (昭47), 207, 山海堂.
- (11) 田辺・岩田, 機講論, No. 778-2 (昭52-5), 155.

## 討 論

〔質問〕 清水 勲 (茨城工業高等専門学校)

スキッシュ流などを大略的に測定するとしてもなお, LDV の使用に際しては, 例えば測定対象に適した光学系や信号処理などについて十分に検討する必要がある。そこで,

(1) 396 ページ右欄 15 行め以下に周波数トラックの性能が記してあるが, このうち各レンジの作動範囲 20:1 とは具体的にどういうことか。396 ページ右欄 3 行めにある周波数シフタのシフト周波数はいくらか。また 397 ページ右欄下 2 行め, (電磁) オンロググラフの周波数特性はいくらか。これらのすべてを考慮したドップラシフト周波数の処理は適正であるのか。

(2) 測定体積の大きさ  $V_s$  はおおよそいくらか。396 ページ右欄 12 行めにピンホール径  $50 \mu\text{m}$  とあるが, これによって測定体積の一边が形作られるのか, またこの光学系がコヒーレントの光学系か否かなど判定する基準となるから, 受光光学系のレンズ焦点距離, 口径, 受光光学系の倍率などを明確に示す必要があると思う。

更に供給粒子密度について著者らは詳しく言及していないが, 397 ページ左欄 15 行め以下のように, 粒子を連続的に  $V_s$  に供給するためには  $V_s \approx 1 \times 10^{-1} \text{mm}^3$  と推測し, ポアソン分布から確率計算する(付1)と, 多数個の粒子が同時に  $V_s$  中に存在する確率が増加する。測定体積中に速度こう配などがある場合, 多数個の粒子が同時に  $V_s$  中に入ると正確な速度の測定ができない。さて図 6 の ATDC, 図 10, 12, 13 などのデータを見てもかなりの速度こう配や乱れがあると思われるから, 396 ページ右欄下 14 行めの測定体積の長さ  $10 \text{mm}$  とあるのは, いかにも長すぎると思うがいかがか。

(3) 図 6 のスキッシュ流速は図 5 の各サイクルの流速の平均値をとったものか。また平均をとったとす

れば, 各クランク角度におけるアンサンブル平均か, それとも時間平均流速であるのか。平均サンプル数はいくらか。

〔回答〕 (1) (i) 周波数トラックの五つのレンジはそれぞれ周波数で  $0.1 \sim 1$ ,  $1 \sim 10$ ,  $10 \sim 100 \text{kHz}$ ,  $0.1 \sim 1$  および  $1 \sim 10 \text{MHz}$  であり, 各レンジには下に  $1/\sqrt{2}$  倍, 上に  $\sqrt{2}$  倍の余裕がある。たとえば第 5 レンジは,  $0.7 \sim 14 \text{MHz}$  が処理可能周波数であり, 上下の周波数の比をとった作動範囲は  $20:1$  となる。

(ii) 入射両光線に周波数シフタが入れてあり, それぞれのシフト周波数は約  $40 \pm f/2 \text{MHz}$  で, 両者の差の周波数  $f$  が有効なシフト周波数であり,  $f$  は  $7.5, 25, 75, 250, 750 \text{kHz}$ ,  $2.5$  および  $7.5 \text{MHz}$  の 7 段階に変えることができる。図 5 では  $75 \text{kHz}$ , 図 8 および 11 は  $750 \text{kHz}$  を使用した。

(iii) 使用したガルバノメータの感度一様な周波数は  $1600 \text{Hz}$  (一部は  $350 \text{Hz}$ ) であり, これが全信号処理系中で最も周波数特性が悪いが, 図 11 に示した発火運転時のスキッシュ流, 吹き込み流および噴出流などの基本周波数は約  $70 \text{Hz}$  であり, 本実験の範囲ではいずれにしる十分な周波数応答性をもっていると思う。

(2) (i) 測定体積の大きさは入射光線強度がガウス分布をしているので, どの強さの位置をとるかにより変わり, また受光系の信号レベルのしきい値の設定によっても見掛けの大きさが変化するので一義的ではないが, ここでは  $1/e$  の強さを示すひし形の長さが  $10 \text{mm}$ , 幅 (および奥ゆき) が  $0.33 \text{mm}$  と推定した。また, この中に含まれる最大だ円体の大きさは長径が約  $7 \text{mm}$ , 短径が約  $0.24 \text{mm}$  となり, その体積は約  $2 \times 10^{-4} \text{cm}^3$  である。またピンホール径から計算した測定体積幅は  $0.17 \sim 0.33 \text{mm}$  であり, 上述した交差部の幅と同程度である。

(ii) 受光光学系の集光レンズはカメラ用のレンズ

(付 1) 清水・江森, 機論, 42-354 (昭 51-2), 603.



で焦点距離  $f=50$  mm, 絞り  $F=1.8\sim 16$  (口径  $d=28\sim 3$  mm), レンズと測定体積の距離  $a=250\sim 510$  mm, レンズとピンホール間の距離  $b=75$  mm, 倍率  $M\equiv b/a=0.3\sim 0.15$  であり, 絞りのコヒーレント直径(付2)は約 1 mm となるのでノンコヒーレントな受光系である. 測定上  $a$  と  $F$  を変えた影響はほとんどないが,  $F$  を絞りすぎると信号が弱くなって使えなくなる.

(iii) 測定体積  $2\times 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> 中に散乱用粒子が 1 個の割合となるよう粒子を供給すると仮定すると, 粒子密度は  $5\times 10^8$  個/cm<sup>3</sup> となる. このとき測定体積中に粒子のある確率を貴論文(付1)より計算すると, 1 個が 37%, 2 個が 18%, 3 個が 6% であり, 信号三つのうちの一つは他の粒子の影響を受けることになる. 測定体積中に  $\omega_1$  と  $\omega_2$  の周波数を出す粒子があるとき, 観察される周波数はモデル的に  $\omega_1, \omega_2, (\omega_1 + \omega_2)/2$  および  $(\omega_1 - \omega_2)/2$  の四つの可能性があり(付3), 平均的な流速を求めている本実験では前三者

(付 2) Drain, L.E., *J. Phys.*, Pt. D, 5-3 (1972-3), 481.

(付 3) George, W.K., Jr., *Proc. LDA-Symp., Copenhagen, Tech. Univ. of Denmark*, (1975-8), 20.

のいずれが卓越してもさしつかえない.  $(\omega_1 - \omega_2)/2$  のビート周波数が検出される場合は問題であるが, 一般にかなり低い周波数になるのでトラックの作動範囲外になるか, もしならない場合でも, 数サイクルを比較してみればこのような点は除外されよう. また最初の仮定による計算では, 1 個および 2 個の粒子がある場合が合計 55% であるが, 実験状態での信号密度より散乱用粒子量を推定すると, これよりもかなり少なく<sup>(3)</sup>, ご指摘の正確な速度の測定ができない場合は少なく, またデータ処理上補正されるものと思われる.

(iv) スキッシュの吹出し幅 72 mm に対し, 測定体積の見掛けの長さ 10 mm は確かに大きい<sup>(3)</sup>, 3.1 節に述べた条件を勘案した結果であり, ご指摘のとおり, より空間分解能を高くするためにはより測定体積を小さくするのが好ましい.

(3) 図 5 は単一圧縮の実験であり, 再現性が良いのでそれぞれ 3 回の実験の平均をとった. 平均は代表的なクラック角度における値ごとに行っており, アンサンブル平均である. なお図 10 および 13 では 5~6 サイクルの平均をとっている.