

レーザシート法によるシリンダ内 流れの3次元測定

Three Component Particle Velocimetry Using Laser Sheets
for Cycle-Resolved, In-Cylinder Measurement

浦田 泰弘*	吉田 一夫*
Yasuhiro URATA	Kazuo YOSHIDA
大野 敏久*	石井 清*
Toshihisa OHONO	Kiyoshi ISHII

要 旨

燃焼のサイクル変動の基本的要因である筒内の流れについて、シリンダ内全体の様子やサイクル毎の違いを知るために、レーザシート法を用いた三次元流れの瞬時面測定が可能な“Particle Coded-Pulse Velocimetry”(PCPV)法を開発した。パルスコード化された多層のレーザシート光中を通過する微粒子を撮影し、その画像より測定面の三次元速度分布を得ることができる。本報告では、この計測手法について説明し、次いで“1.5L 可変バルブタイミング機構付きリーンバーンエンジン”(以下、VTEC-E)を例にとりシリンダ内の多断面の測定結果を示す。シリンダ軸に沿った上昇および下降流れと、これに垂直な面の流れの相対の様子が良く分かり瞬時測定の特徴を示すことができた。またスワールやタンブル流れは下死点以降に生じ、その値は定常流試験より得られた結果と良い一致を示すことが確認できた。

ABSTRACT

Combustion variations are related to the cycle to cycle differences in the flow throughout the cylinder which can be measured by a particle coded pulse velocimetry (PCPV) developed for cycle-resolved, planar measurements of three components of velocity. Laser sheets were introduced through a glass liner and pulsed to measure the velocity of small seed particles. The PCPV was applied to a VTEC-E engine to record the flow pattern throughout the cylinder, the swirl and tumble motion developed only after BDC and derived swirl and tumble ratios were in good agreement with those measured by an impulse swirl meter.

1. まえがき

燃焼の解析には、燃焼場の流れを計測することが不可欠であり、流れによって生じるさまざまな変化を利用してより良い燃焼を得る努力がなされている^{1) 2)}。しかし燃焼現象から変動が無くなることはなく、その基本的要因である空気流れについて微視的観点から解析が進められてはいるが³⁾、実機エンジン内で起きている全体的な流れの変動についての研究は、Yoo等⁴⁾が行った走査型三次元LDVを用いたシリンダ内の瞬時面測定の例があるが、まだその数は少ない。これはシリンダ内という場所的制約と適当な計測法がないことによる。

エンジン内の流れは、非接触測定が可能なレーザドップラ流速計(LDV)やレーザシートを光源とする撮影法によって計測されることが一般となっており、測定の目的によって使い分けられている。前者はある点におけるサンプルレートの高いデータが得られるが、全体の流れを表すときには非常に多くのサイクルからの平均流れとなり、面におけるサイクル変動の様子について知ることはできない。流れが変動を持つことは、測定点の速度および向きが同時に変動していることであり、変動の大きい領域では速度の分散が大きくなり平均値は小さく示され、したがって積算平均化された結果は実際の流れと大きく異なったものとなり、現象の理解を難しくしている。

* 和光研究所

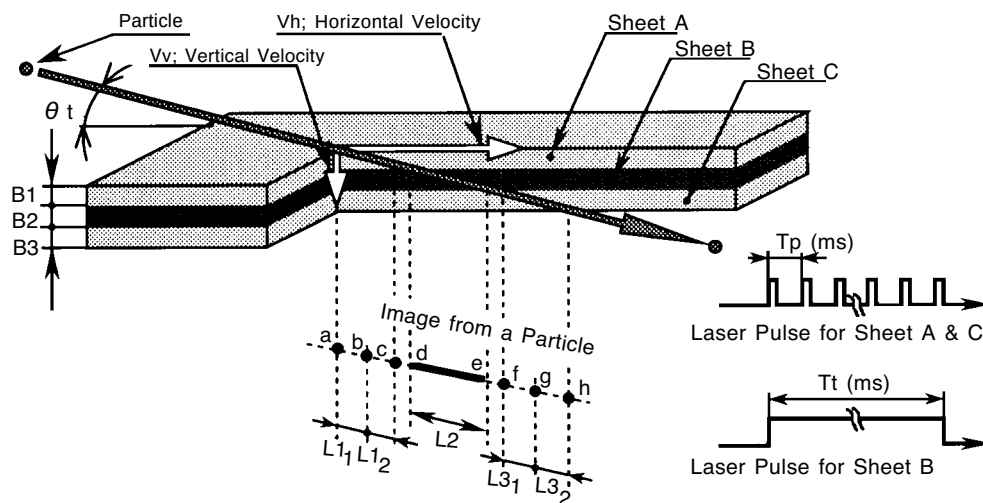


Fig. 1 Principle of Particle Coded Pulse Velocimetry

後者ではある時刻の面側定が可能となり、時系列な測定についてはParticle Tracking Velocimetry法を付加することで、またParticle Image Velocimetry法を付加すれば微小領域の乱れについての解析が可能となるなどの特徴を持つが、まだ二次元の測定が主である。

エンジン内全体の流れの様子を良く掴むには、三次元速度の瞬時面測定、さらには多層断面の測定が必要である。しかし先に述べた理由から、三次元速度分布を求めるために平均化処理を必要とする手法は用いたくない。

このような要求に対して、多層のレーザシートを用いて三次元速度分布の瞬時測定を可能とする計測システムを開発したので、この計測システムの構成、測定精度について説明し、次いで実例としてVTEC-Eへの適用結果を示し、積算平均されたものに比べより流れの特徴が表せたこと、下死点までは明確なスワール流れが生じないこと、圧縮行程中のスワールやタンブルレシオは定常流試験の結果によく合うことなどについて述べる。

2. 計測システム

2. 1. 測定の原理

測定の原理を Fig. 1 に示す。図は三層に構成されたレーザシート（シート A, B, C）と、その中を通過する粒子の流線と撮影された軌跡を表している。中央のシート B とこれを挟む上下のシート A と C は、音響光学素子（AOM）によってパルス間隔（ T_p , T_t ）を変化させられ識別される。シート B は測定時期に連続発光とし、シート A と C はパルス状とし多くの場合はパルス間隔を同じに

している。上下方向の流れの向きを知りたい場合には、シート A と C はパルス間隔を変えて用いる。

撮影された画像より、シート A, B, C を通過した時の軌跡間の長さ ($L1n, L2, L3n$) とパルス間隔 (Tp) より通過時間を求め、シート面に平行な速度成分 (水平速度: Vh) が求められる。また中央のシートの厚さ ($B2$) とその軌跡長さ ($L2$) の逆正接比は、粒子がシート面へ侵入する角度 (侵入角: θt) に相当する。よってシート面に垂直な速度成分 (垂直速度: Vv)、水平速度 (Vh) および侵入角 (θt) は以下の式となる。

$$V_V = \frac{V_h \times B_2}{L_2} \quad (1)$$

$$V_h = \frac{\sum_{n=1}^n L_{1n}}{n \times T_p} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{B_2}{L_2} \right] \quad (3)$$

2. 2. 測定速度範囲

垂直速度の測定精度は、(1)式中の $L2$ および V_h の検出精度によって決められ、粒子侵入角が大きくなると $L2$ が短くなり検出誤差が大きくなるなど、三次元速度の計測法とはいえ、幾つかの制約がある。本項では、対象とする速度範囲、測定場の分解能、精度に対する考え方について述べる。

Fig. 2 はエンジン回転数 (Ne) 1500 rpm、スロットル開度 (θ_{th}) 全開状態 (WOT)、測定断面はピストン上死点より 10 mm 下 ($Z=10$ mm) での、吸気流速が最大となるクランク角 ($CA=450^\circ$)、ピストン下死点 ($CA=540^\circ$)

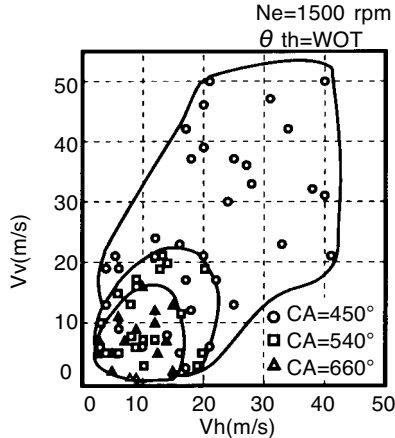


Fig. 2 Air Velocity Distribution in Cylinder at $Z=10$ mm, for Motored Operation

および圧縮上死点前 60° ($CA=660^\circ$)における垂直 (V_v)、水平 (V_h) 速度分布図であり、吸気、圧縮行程で大きく速度領域が異なることが分かる。粒子のシート面への最大侵入角は約 75° 、吸気行程中の垂直および水平速度の最大値はそれぞれ 50 m/s と 40 m/s であり、圧縮行程ではそれぞれ 22 m/s と 20 m/s となった。よって測定対象領域は垂直、水平速度共に $3\sim 50\text{ m/s}$ とした。速度の下限値はシリンダ内の全体的な流れを把握するのに支障が無いと考えられる 3 m/s とした。

本計測法での、垂直速度の空間分解能は V_v 検出用のシート B の厚さ (B_2)、時間分解能はシート B の発光時間 (T_t) に相当し、各々 1.5 mm 、 1 ms 以下とした。これらは 75 mm のピストンストローク長に対しての 1.5 mm 、エンジン回転数 1500 rpm における 1 ms はクランク角で 9 度となる。サイクル毎の変動の様子を観察するためには、さらに小さな値としたいが大きな速度領域をもつこの場合には、次項で述べる幾つかの制約より妥協点と考える。

速度検出の精度は、軌跡長さ $L_1\sim L_3$ を抽出する際の画素の読み取り誤差で決まり、 10% 以下を目標とする。このためには $50\times 50\text{ mm}$ の可視化領域につき、 1000×1000 画素以上の解像度を持つカメラが必要となる。さらに高精細な画像が得られるフィルムへの直接撮影法を用いれば、同等の検出精度でも時間、空間分解能を小さく、またレーザシートの設定条件の幅も大きくできることとなる。大光量のレーザシートを生成し高速度フィルムカメラと併せれば、連続な三次元速度の面測定も可能となる。ここでは測定画像のデジタル化が容易な 1000×1000 画素の CCD (Charge Coupled Device) カメラを用い

Table 1 Design Requirements for Measurement System

Air Velocity in Cylinder	
Suction Stroke	
Vertical Comp.	$2\sim 50\text{ m/s}$
Horizontal Comp.	$3\sim 40\text{ m/s}$
Compression Stroke	
Vertical Comp.	$1\sim 23\text{ m/s}$
Horizontal Comp.	$2\sim 20\text{ m/s}$
Maximum Inclination Angle	$\sim 75^\circ$
Measurement System	
Measurement Range for Velocity	
Vertical Comp.	$3\sim 50\text{ m/s}$
Horizontal Comp.	$3\sim 40\text{ m/s}$
Resolution for	
Time Scale	1 ms
Spatial Scale	1.5 mm
Detected	
Error	under 10%
Number of Loci	over 300
Maximum Inclination Angle	$\sim 70^\circ$
Particle Trap Ratio	over 40%

ることとした。

また測定原理より、シート A, B, C 内を通過する粒子が低速度または侵入角が大きい場合の軌跡は、Fig. 1 の a～h 点が重なり合い検出不能となるため、 V_v, V_h の最低速度を 3 m/s 、最大侵入角を 70° とし、これを超える範囲での測定を必要とする場合には、レーザシートの照射角度を変更して測定を行う。

その他として、レーザシート中にある粒子の有効利用率 (ϕ) を考慮する必要がある。当然 ϕ は大きいほど解析可能な粒子の割合が増し、したがって吸入空気中に混入させる粒子数を減少できシャープな画像が得られることとなる。ここでは経験的に $\phi = 40\%$ とした。以上をまとめて、Table 1 に示す。

2. 3. レーザシート条件の決定

ここでは前項で掲げた目標性能を満足するシステムの諸条件の設定について述べる。Fig. 3 は V_v-V_h マップ上

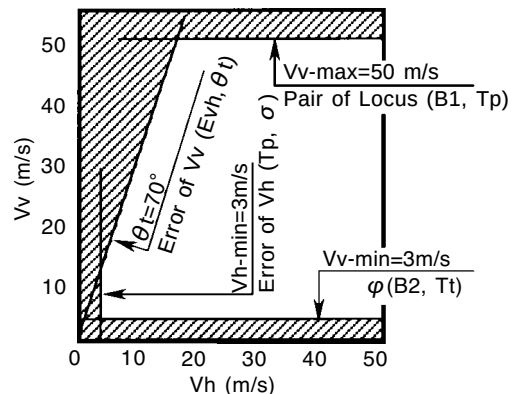


Fig. 3 Target Velocities and Their Origins in PCPV

の各限界値とそれを決定する要素を示し、例えば「Vvの最小限界値 (Vv-min) は $\phi = 40\%$ で制限され、B2 と Tt によって決められる」ことを示している。さらにそれらの限界値についての説明を以下に記す。

Vvの最大限界値 (Vv-max) は、シートAを通過する粒子がシートAのパルス間隔 (Tp) 内に最低一對の軌跡を残せる粒子速度となる (Fig. 1では、シートA,C中で各々二對の軌跡 (a-b・b-c, f-g・g-h) が得られている状態を示している)。従って、シートAの厚さ (B1) とパルス間隔 (Tp) で決まる。他に粒子の有効利用率 (ϕ) も考えられるが、B1, Tpの方が先に限界を示す。

Vv-minは、粒子がパルス間隔 (Tt) 内にシートA,B,Cを通過完了し、Fig. 1のような軌跡を残せ、かつ $\phi = 40\%$ を満足する最小速度となる。ここでは ϕ の方が先に限界を示すので、 ϕ を式 (4) に代入して求められる。

$$Vv\text{-min} = \frac{\phi (B1+B2+B3)B2}{(1-\phi)Tt \cdot 4.5 \times Tp} \quad (4)$$

Vhの最小限界速度 (Vh-min) は、Tp間の軌跡が重ならないことおよびVhの検出誤差 (Evh) が10%以内であることが条件となるが、後者の方が先に限界を示す。速度の遅い粒子は、軌跡と軌跡の間の画素数が少ないため一画素の検出誤差が大きく影響し、Fig. 1中の点a-b間のみからEvhを求めると目標精度を満足できなくなるので、図の点aより点gまでの画素数を用いて求めること

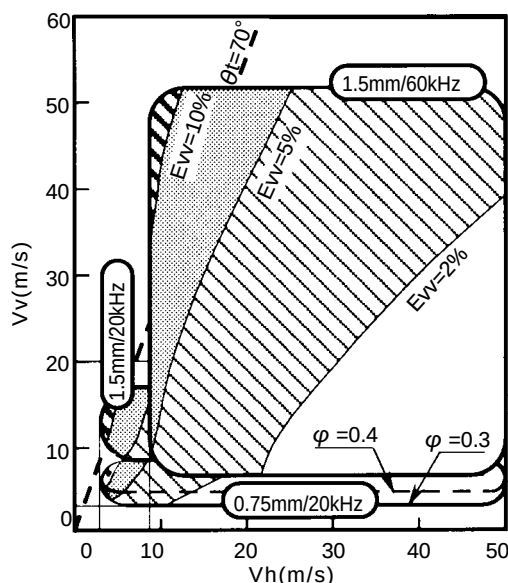


Fig. 5 The Velocity Range and Error Ratio, Evv, for Three PCPV Arrangements

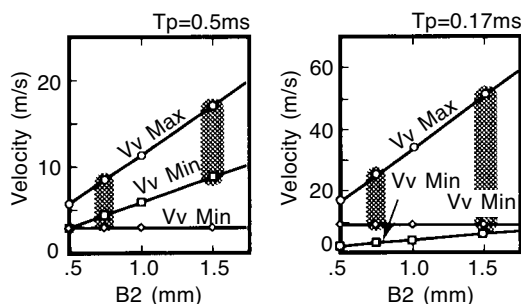


Fig. 4 Limit Velocities of Vv and Vh Component as a Function of Laser Sheet Thickness

とし、式 (5) に示す。Vh-minはこれに $Evh = 0.1$ を代入し求める。ここで、 σ は画素の大きさを示す。

$$Evh = \frac{\sqrt{0.5 \times \sigma^2}}{5.1 \times Vh \times Tp} \quad (5)$$

$$Vh\text{-min} = \frac{\sqrt{0.5 \times \sigma^2}}{0.51 \times L1} \quad (6)$$

垂直速度の検出誤差 (Evv) は、式 (1) より L2 の検出誤差 (EL2) と水平速度の検出誤差 (Evh) の相乗平均値で表されるとし、式 (7) に示す。Evv はほぼ EL2 で占められ、EL2 は θ と B2 によって決められる。

$$Evv = \sqrt{Evh^2 + EL2^2} \quad (7)$$

Fig. 4 に $\sigma = 50 \mu m$ 、 $Tp = 50 \mu s$ (20kHz) と $16.7 \mu s$ (60kHz) とした場合の各限界値 (Vv-max, Vv-min, Vh-min) とシートの厚さ (B2) の関係を示す。

$Tp = 50 \mu s$ のみでは Vv-max の領域が不足し、 $Tp = 16.7 \mu s$ では Vv-min, Vh-min の領域に不足することが分かる。従って一種類のシートの厚さのみでは、吸気行程の測定領域を満足できず、二種類のシート厚さを用いねばならない。本システムでは図中に示した 0.75, 1.5 mm のシート厚さを用いて、各々のパルス間隔を $50 \mu s$ と $16.7 \mu s$ として目標測定領域を満たした。二種類のシート B からの軌跡を判別するために、異なった色のシート B を作り用いた。

Fig. 5 に二種類のシート厚さとパルス間隔を用いたときの各測定領域と垂直速度の誤差率を、Vv-Vh マップの上に示す。Vv=20m/s, Vh=9m/s 付近において部分的に測定不能領域がある。また Vv=3m/s 付近では ϕ が 30% 台となること、Vh=3m/s 付近では垂直速度の誤差率が 10% を

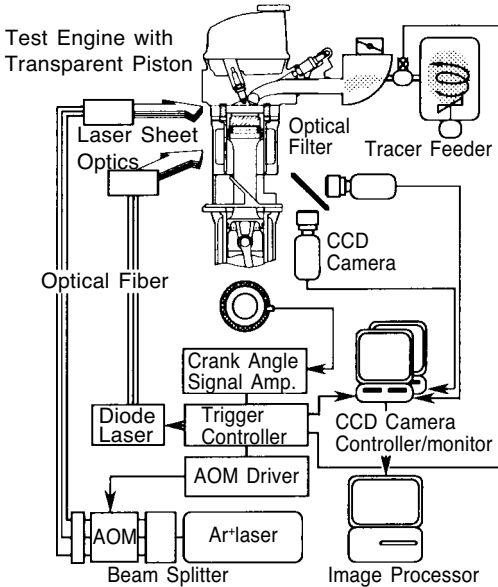


Fig. 6 Schematic of Instrumentation Used to Measure 3D Air Velocity by PCPV

わずかに超えることなど完全ではないがほぼ目標精度を満たせることが分かる。圧縮行程の場合には速度の分布領域が狭いので、図に示すシートの組み合わせをより簡略化できる。

2. 4. 計測システムの構成

Fig. 6に、本計測法のシステム構成を示す。2色のレーザシート光源として、青緑色のArイオンレーザと近赤外の半導体レーザを用い、吸入空気に混入させる粒子は平均粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ のExpancel DE-551を用いた。撮像はオブ

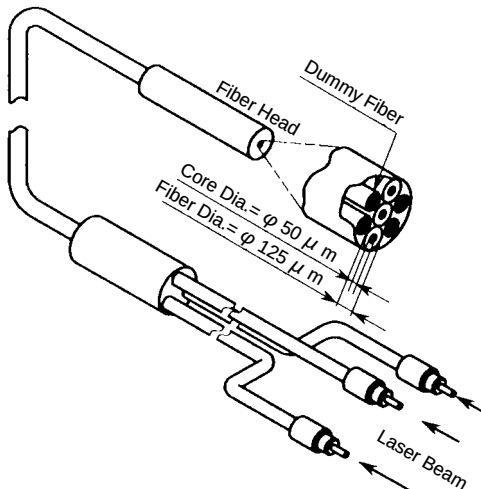


Fig. 7 Optical Fiber Arrangement for Three Layer Laser Sheet

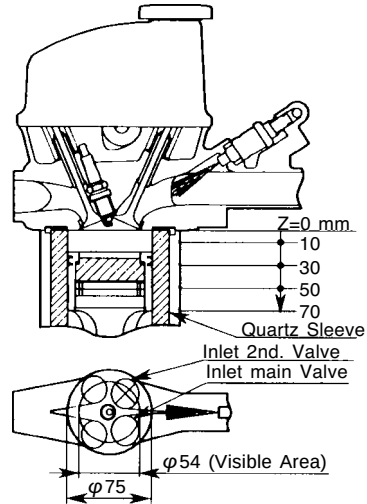


Fig. 9 Optically-accessed Single Cylinder Engine

ティカルフィルタを通して2台の 1000×1018 画素のCCDカメラで行った。得られた画像は画像処理器に転送され、2枚の画像の位置合わせを行い、半自動的に粒子軌跡の抽出を行っている。

Fig. 7, 8に示すようにコア径 $50\text{ }\mu\text{m}$ ($100\text{ }\mu\text{m}$ 径)のファイバを3本重ね三つの点光源を作り、15倍の拡大レンズ系とシリンドリカルレンズで各々 0.75mm (1.5mm)の三層のレーザシートを構成した。3本重ねのファイバは4本のダミーファイバで位置決め固定される。シート厚さを均一とするため、シート幅、厚さ方向にスリット板を設け不要な部分を除いた。

3. エンジン諸元と運転条件

三次元速度の面測定は、Fig. 9に示す可視化仕様エンジンを用いて行った。その主要諸元と運転条件をTable 2

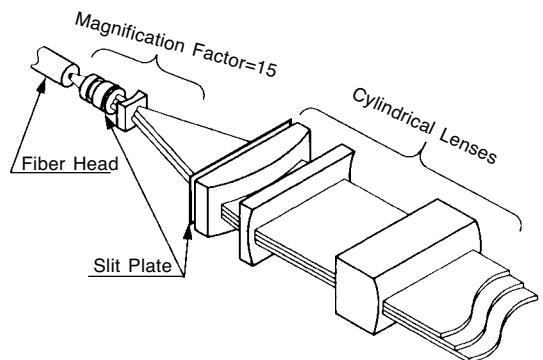


Fig. 8 Optics to Generate Laser Sheets

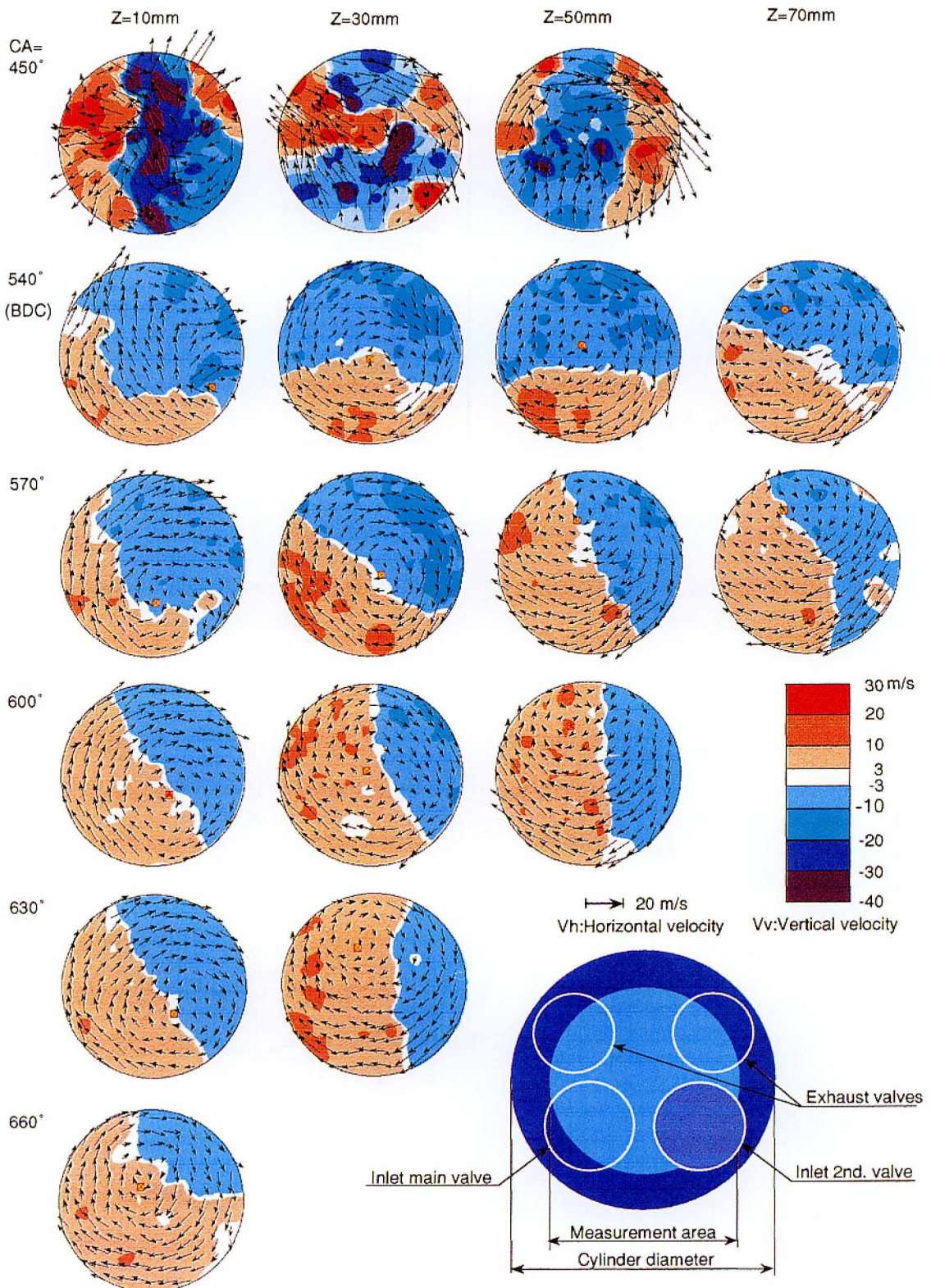


Fig. 10 Contours and Vectors of Instantaneous Air Velocity Measured by PCPV from Non-consecutive Cycles

に示す。シリンダ内全体の流れを測定するためにシリンダスリーブ、ピストンリングの材質を各々石英、樹脂材とし、長時間のモータリング運転を可能としている。このエンジンの吸気流れの特徴は、部分負荷運転状態では希薄燃焼を可能とさせるため、吸気側セカンダリバルブのリフト量を抑制し、適切なスワールレシオ (S/R) とタンブルレシオ (T/R) を得ていることにある。

4. 実験結果

4. 1. シリンダ内の三次元流れ

Fig. 10にPCPV法による測定例を示す。水平速度 (V_h) は矢印の長さで、垂直速度 (V_v) をカラーで表わしている。暖色系の色が濃くなると上向き (シリンダヘッド方向) の速度が大きくなり、寒色系の色は下向きの速度を示す。測定精度の低い $\pm 3\text{m/s}$ の速度領域は白色で示す。一画像から得られる有効な軌跡数は300～500組であり、図はその測定結果を補間し表示している。測定断面位置 ($Z=10\text{mm}\sim 70\text{mm}$) は、Fig. 9に示すようにピストン上死点位置からの距離で示す。図の縦方向には、同じシリンダ断面位置でのクランク角の変化を示し、横方向には同一クランク角における断面の変化を示している。これらの各図は、連続測定されたものではなく、個別のサイクルより得られ、サイクル毎の違いがあるがここでは論じないこととする。

吸気行程 ($CA=450^\circ$) では、吸入空気はシリンダ中央を吸気弁より排気弁方向に下降し、側面に沿って上昇し峡谷状の分布を示している。この上昇および下降流の速度分布の勾配は急であり、数mmの場所違いで 50m/s 以上の速度差が生じている部分もある。ピストン頭部に達する流れは、スワール方向に整えられ始めていることがうかがえる。この段階ではスワールやタンブル流れは形成されるに至っていない。

吸気下死点 (BDC, $CA=540^\circ$) では、吸入が終了するのでシリンダ中央の下向きの強い流れは減衰し、流れが整えられている。 $\pm 3\text{m/s}$ の白色部分を隔てて上昇および下降流が明確に区分され、排気弁側で下向き、吸気弁側で上向きの流れとなり、またシリンダ上部よりもピストン頭部側の方が流れの均一化が早く進むなど、スワールやタンブルの形成過程が分かる。

吸気下死点以降は、シリンダ上部へ流れも均一化がさらに進み、タンブル流れもスワール方向へ回転している

Table 2 Optical Engine Specifications and Operative Conditions

Engine Specification	
Cylinders	1
Displacement	360 CC
Bore/Stroke	$\phi 75/81.5\text{ mm}$
Compression Ratio	9.1
Valve Mechanism	VTEC-E
Number of Valves	4
Swirl Ratio	2.3 (Swirl Meter)
Tumble Ratio	1.9 (Swirl Meter)
Engine Operative Conditions	
Speed	1500 rpm
Volumetric Efficiency	
PCPV Measurement	WOT
LDV Measurement	57%
A/F Ratio	
PCPV Measurement	Air Only
LDV Measurement	14.7

のが分かる。圧縮上死点に近づくと ($CA=660^\circ$)、燃焼室形状の影響で流れが崩れ始めていくのが図中の白色部の形状変化よりうかがえる。

このようにPCPV法は、吸気過程のダイナミックな上昇および下降流や圧縮行程後半の整然としたスワール、タンブル流れの、どちらにも有効であることが示せた。

4. 2. スワールレシオとタンブルレシオ

Fig. 11に各セルの水平速度 (V_h) 成分の運動エネルギーの総和および垂直速度 (V_v) 成分の運動エネルギーの総和より求めた、圧縮行程中のスワールレシオとタンブルレシオの変化を示す。シリンダ内空気の慣性モーメントは、下死点の時の値を用いた。また定常流試験結果 (※印)

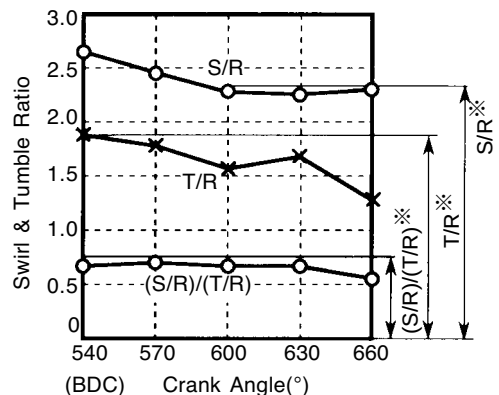


Fig.11 Variation of Swirl and Tumble Ratio with Crank Angle. Note that Marked Values, ※, are Measured with a Steady Flow Apparatus.

との対比も図中に示す。

スワールレシオは上死点に向かって微減するが、上死点前で微増している。これは上死点付近ではタンブル流れが壊され、スワール方向に流れが偏向されたと考えられる。タンブルレシオも上死点に向かって微減するが、一時CA=630°で微増する。またCA=660°までの減少率がスワールに比べ大きいことが分かる。シリンダヘッド単体の定常流試験結果はスワールの場合は流れが均一化するCA=600°近辺で、タンブルでは減衰が生じない下死点位置で、良く一致してくると思える。

4. 3. LDV計測との比較

Fig. 12に、LDVを用いて測定した結果⁵⁾を示す。PCPV法で計測した時と条件が多少異なり、それらを列記する。エンジンはファイアリング状態であり、測定用の粒子径は1 μ m以下の燃料液滴を用いた。LDVでは各点の連続測定であり、 $\pm 10^\circ$ クランク角の測定値を平均し代表値とした。測定断面はZ=10 mmのみであり、水平速度は約50箇所、垂直速度はさらに約100箇所を加え、シリンダ壁面近くまでを測定した。

Fig. 10と対比し、似ているが積算平均化によって非常に均一な速度分布となったことが分かる。この流れの様子は、エンジンの平均的な流れを表してはいるが、この流れが多サイクル中に一サイクルと言えども実在するとは考えられない。

CA=450°を比べると、Fig. 10に見られる中央の峡谷状の下降流は小さくなり、吸気弁側に寄る。これは吸気弁近くの流入空気のサイクル変動は比較的小さく、その下流側の排気弁下では大きくなると考えられ、積算平均化によって変動の大きい場所の方がより特徴を消してしまったと考えられる。図の白色部分は ± 2 m/sの領域を示すが、Fig. 10と同じ値である ± 3 m/sに揃えると白色部分をもっと広がってしまう。これも流れの向きの対向する領域近くは、積算平均化によって流れの境界が不鮮明となった例である。水平速度(矢印; 単位長さ当たりの速度はFig. 10の50%)についてもFig. 10に比べ同一計測点で20%前後小さな値を示す傾向にある。

このように測定目的が“シリンダ内で実際に起きている特徴ある流れ解析”にある場合、LDV法での解析は不十分である。

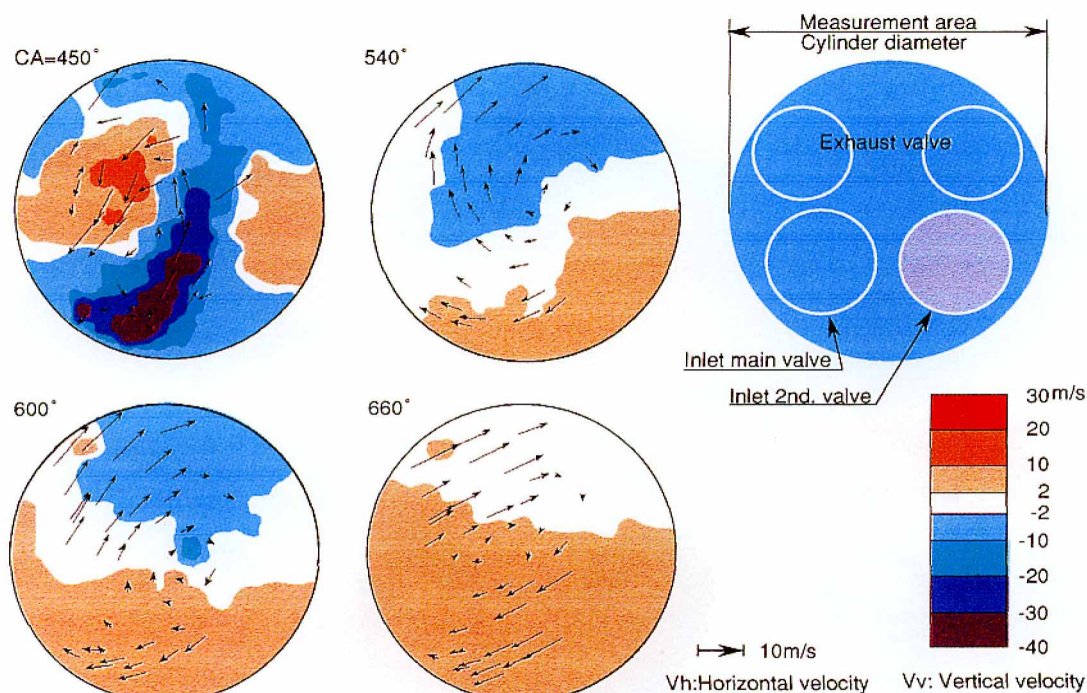


Fig. 12 Contours of Averaged Air Velocity Measured by LDV at Z=10 mm

5. まとめ

シリンダ内の上昇流と下降流の境界域の複雑な流れや、変化の激しい吸気行程流れの測定が可能な三次元流れ測定法を開発し、エンジンでの測定を行い以下の結果を得た。

- (1) シリンダへの流入から、スワール、タンブル流れが生成される過程を示すことができた。
- (2) 平均化された流れの様子は、実際に存在する流れと異なり、変動の大きい状態では特に注意を要す。
- (3) シリンダ内の流れの全体像が把握され、燃料液滴の挙動解析に役立った。
- (4) シリンダヘッドの定常流試験結果より得られるスワール、タンブルレシオは、実エンジン内の流れと良い一致を示す。

参考文献

- 1) 藤本昌彦、「ガソリン機関の混合気形成におよぼすスワール流の影響」、第11回内燃機関合同シンポジウム論文集(1993) p.523
- 2) K.Kuwahara, 「Influence of Flow Field Structure after the Distortion of Tumble on Lean-Burn Flame Structure」, COMODIA (1994) p.89
- 3) 森吉泰生、「燃焼室形状がガス流動のサイクル変動に与える影響の予測」、機械学会論文集61巻590号(1995), p.3446
- 4) S.Yoo, 「3-D LDV Measurement of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four-Valve SI Engine」, SAE Paper 950648
- 5) Y. Hardalupas, 「Influence of Injection Timing on In-Cylinder Fuel Distribution in a Honda VTEC-E Engine」, SAE Paper 950507

■ 著 者 ■



浦田 泰弘



吉田 一夫



大野 敏久



石井 清