

ディーゼル機関筒内流動のレーザ計測

植木 弘 信* 石田 正 弘* 片岡 洋 一**
黒川 清 司* 吉村 良 孫*In-Cylinder Flow Measurement in Diesel Engine
by Laser Velocimeter

by

Hironobu UEKI*, Masahiro ISHIDA*, Yoichi KATAOKA**
Kiyoshi KUROKAWA*, Yoshihiro YOSHIMURA*

In order to measure in-cylinder flow of direct injection diesel engine accurately by laser doppler velocimeter (LDV) with frequency tracker, a new data acquisition technique was developed. In this method, only available velocity data are obtained and all of them are related to crank angle. The results of the measurements can be monitored by an online and real time system with a personal computer. Velocity measurements in circumferential direction were made at the position apart from the inside of the cylinder head by 13mm near the center of the cylinder. Test engine has a cylinder bore of 102mm and a stroke of 106mm. Mean velocity and velocity fluctuation were derived from statistical analysis of LDV data and the reliability was investigated by calculating the confidence interval. The experimental results are as follows.

- (1) Velocity distribution histogram within a crank angle interval of 5 degrees can be approximated to gaussian distribution.
- (2) Even if the number of sampling data varies with crank angle, mean velocity and velocity fluctuation can be acquired accurately during intake and compression stroke by obtaining 10000 velocity data in many engine cycles. Lack of data in a certain crank angle interval can be indicated in confidence interval distribution.
- (3) Velocity fluctuation is about a half of the maximum mean velocity in intake stroke, but in compression stroke it is low and varies little.
- (4) Moving average over a crank angle interval of 5 degrees decreases the confidence interval of both mean velocity and velocity fluctuation to 20 % of mean piston speed.

1. まえがき

ディーゼル機関において筒内流動の把握は燃焼性能の改善や有害な排気生成物の低減を計る上で重要である。レーザ流速計は非接触で流動計測が行えるのでディーゼル機関の筒内流動の計測に適しており、計測法、データ解析法ならびに計測結果等についての報告

がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、工業上有用なデータが公表されている例は稀である。また、レーザ流速計のデータは散乱粒子が測定点を通過する時だけ離散的に得られるが、機関のクランク角度に対する流速の変化が連続的な流速波形として処理されている場合もある。機関筒内の流れは非定常かつ複雑であり散乱粒子

昭和61年9月30日受理

* 機械工学第二学科 (Department of Mechanical engineering II)

** 大学院修士課程機械工学第二専攻 (Graduate Student, Department of mechanical engineering II)

が測定点へ到達しにくい場合があるし、圧縮行程では散乱粒子の空間的な濃度が高くなることも考えられるから、サイクルのある部分ではデータが得られない場合が生じて、連続的な流速波形としての計測ではデータ解析結果に誤差を含む可能性があり、誤差の程度は測定条件に依存することとなる。さらに、レーザ流速計を用いて実機機関の筒内流動計測を行う場合には、測定窓の汚れや流速計を設置する空間的制約等のため光学系のSN比が低下しデータが得られる割合は低くなるから、計測法及び解析法の検討が必要である。

本研究では、レーザドップラ流速計を用いて汎用実機の直接噴射式ディーゼル機関の筒内流動を詳細かつ正確に計測する目的で有効データのみをサンプルして解析する方法を開発し、オンラインで結果をモニタ可能な計測システムを構成して、本方法の有用性ならびに信頼性を検討するとともに、筒内流動の特徴を調べた。

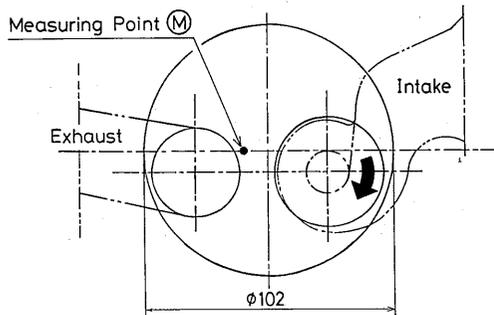


Fig. 1 Illustration of port geometry and measuring point

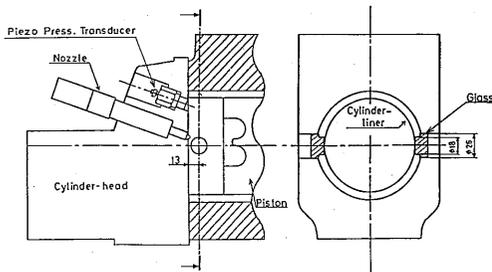


Fig. 2 Installation of window

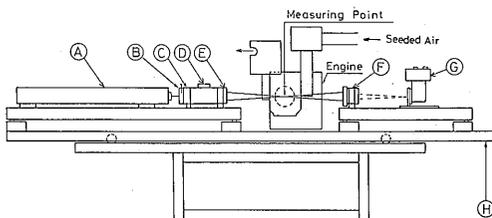


Fig. 3 Optical arrangement of LDV

2. 実験装置システム

2. 1 供試機関

供試機関はヤンマーディーゼル株式会社製直接噴射式4サイクルディーゼル機関 NS180Cである。その主要仕様を Table. 1 に示す。Fig. 1 は吸排気ポート形状であり、吸気ポートは太い矢印で示すようなスパイラル形である。また、Fig. 2 はレーザ流速計測定窓を示しており、シリンダヘッド下面より13mmの位置に直径18mmの石英ガラスが相対して2個取り付けられている。

2. 2 レーザドップラ流速計

レーザドップラ流速計の光学系の構成を Fig. 3 に示し、主要仕様を Table. 2 に示す。He-Neレーザ光源④から出た波長 $\lambda=632.8\text{nm}$ のレーザ光は、偏波面回転器⑤、ビーム間隔を50mmにするビームスプリッタ③、周波数シフタ⑥、焦点距離593mm（レーザ光交差角 $2\theta=4.81^\circ$ ）の収束レンズ⑦を経て、シリンダ内の所定の位置に焦点を結ぶ。この焦点が測定点であり、光軸方向の長径が約10mm、光軸と垂直方向の短径が約0.5mmの楕円体であって、2本のレーザ光により7.6 μm の間隔で干渉縞が作られている。流れの中に存在する散乱粒子がこの焦点を通過するとき発する散乱光即ちドップラ信号をレンズ⑧によって集光し、直径250 μm のピンホールを通して光電変換器⑨で検出する。これらの光学系は測定点を移動させるためのトラ

Table 1 Specification of test engine

形 式	ヤンマーディーゼル株式会社製 横型水冷4サイクルディーゼル機関 NS 180C
燃焼方式	直接噴射式
シリンダ数	1
連続定格出力	15 PS
連続定格回転数	2400 rpm
ボア	102 mm
ストローク	106 mm
コンロッド長	190 mm

Table 2 Specification of LDV

光 学 系	日本科学工業株式会社製 前方散乱差動型 Model 27-0900
レーザ光源	Spectra-Physics 社製 He-Ne レーザ Model 124 B 出力=15 mW, 波長=632.8 nm
信号処理器	日本科学工業株式会社製 周波数トラッカ Model 27-1090 A

パス装置⑩の上に設置されている。光電変換器で電気信号に変換されたドップラ信号は、信号処理器である周波数トラッカによりドップラ周波数に比例した電圧に変換され、この出力により流速が求められる。

光電変換器には内部光電効果を利用した100MHz以下、 $10^{-7}W$ 程度の低強度用フォトマルチプライヤを用いている。レーザドップラ流速計の出力は速度の大きさのみを表し、その向きを弁別することはできない。流速に加えて流れの向きをも同時に測定するために入射レーザ光線の方に40MHzの周波数シフトを与え、測定点の干渉縞を空間的に移動させて逆流の有無を検出する。周波数シフタにはBragg Cellを用いている。

2.3 実験方法及び計測方法

パーソナルコンピュータ（日本電気製PC9801）を用いた実験装置システムをFig.4に示す。吸気は大気圧の状態あるいはルーツブローで加圧され、プレナムタンクで散乱粒子供給装置により散乱粒子が加えられた後、定常流試験の場合に用いられる入口ノズル流量計を経て、供試機関に供給される。機関は直流モータによって駆動され、電機子電圧の変化により回転数が制御される。また、機関とトルクメータとの間に設けられた円盤上のスリットをフォトインタラプタで検出することによってクランク角度で一度ごとの電気パルスが取り出され、カウンタで角度が計測される。一方、

周波数トラッカは離散的数据を得るたびにドップラ周波数に比例した電圧を出力すると同時に、電圧がデータであることを示す有効信号を出力する。この有効信号の出力を待ってAD変換器（コンテック製AD12-16(98)）によりドップラ信号が、またデジタル入出力装置（コンテック製PIO-16/16T(98)）を経てクランク角度データがパーソナルコンピュータに同時に取り込まれ、メモリに書き込まれる。このようにして、得られる全ての流速データはクランク角度と対応がつけられ、多サイクルにわたるデータからクランク角度ごとに平均流速及び流速変動が統計的に計算される。計測の主プログラムにはベーシック言語を用いているが、採用したAD変換器の定格である20KHzの周波数でトラッカ出力電圧及び角度データをパーソナルコンピュータへ取込むことを可能とするために、データ取込のプログラムにはアセンブラ言語を用いている。データ取込のフローチャート及びプログラムをFig.5に示す。各測定点について測定が終了すると同時に、オンラインでクランク角度に対する平均流速及び流速変動の変化がパーソナルコンピュータのディスプレイ上に表示され、測定結果がモニタされた後フロッピディスクに蓄えられる。さらに、データは各測定点ごとに種々の実験パラメタに対して得られ大量となるため、書式変換されたフロッピディスクを介して

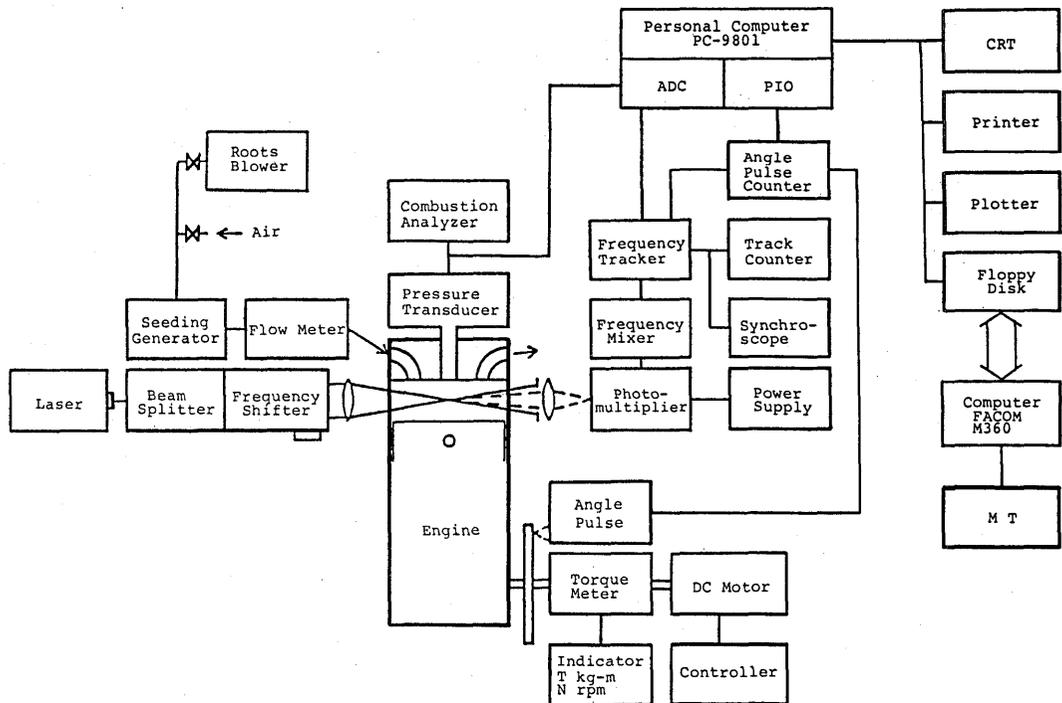
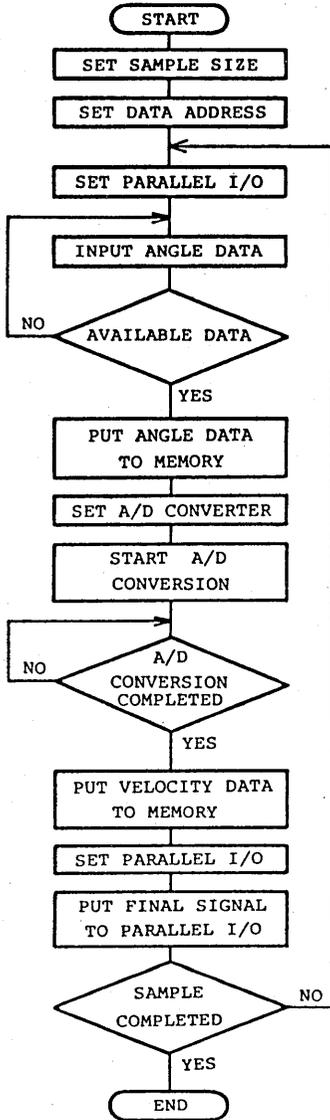


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup



(a) Flow chart

8000 9C	PUSHF	
8001 0E	PUSH	CS
8002 16	PUSH	SS
8003 06	PUSH	ES
8004 1E	PUSH	DS
8005 57	PUSH	DI
8006 52	PUSH	DX
8007 56	PUSH	SI
8008 B9E803	MOV	CX,03E8
800B BF0081	MOV	DI,8100
800E BADA00	MOV	DX,00DA
8011 B80000	MOV	AX,0000
8014 EF	OUT	DX,AX
8015 ED	IN	AX,DX
8016 F7D0	NOT	AX
8018 D1E8	SHR	AX,1
801A 73F9	JAE	8015
801C AB	STOSW	
801D BAD0F0	MOV	DX,F0D0
8020 B81100	MOV	AX,0011
8023 EE	OUT	DX,AL
8024 ED	IN	AX,DX
8025 D1E8	SHR	AX,1
8027 72FB	JB	8024
8029 D1E0	SAL	AX,1
802B AB	STOSW	
802C BADA00	MOV	DX,00DA
802F B80000	MOV	AX,0000
8032 EF	OUT	DX,AX
8033 B80100	MOV	AX,0001
8036 EF	OUT	DX,AX
8037 B80000	MOV	AX,0000
803A EF	OUT	DX,AX
803B E2D1	LOOP	800E
803D 5E	POP	SI
803E 5A	POP	DX
803F 5F	POP	DI
8040 1F	POP	DS
8041 07	POP	ES
8042 17	POP	SS
8043 0F	POP	CS
8044 9D	POPF	
8045 CF	IRET	

(b) Assembly program

Fig. 5 Data acquisition procedure

大型の計算機（富士通M360, 主記憶16MB, 磁気ディスク5352MB）に転送され⁽⁶⁾解析されて, 解析結果とともに磁気テープに保存される。

通常の流れ現象と同様に筒内の流れは絶えず変動しており, またピストン位置及び吸排気弁開度即ちクランク角度に対しても変化するから平均流速及び流速変動を求めるためには統計的な計算が必要である。クランク角度 θ ($\theta=0\sim 719$) に対して得られた流速データ数がそれぞれ $n(\theta)$ 個であり, 個々の流速データを $u_i(\theta)$, ($i=1\sim n$) とすると, 各クランク角度に対する平均流速 $\bar{U}(\theta)$ は

$$\bar{U}(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i(\theta)}{\sum_{i=1}^n 1} \quad (1)$$

と書ける。また, 各クランク角度に対する流速データの標準偏差で流速変動 u' を表すとすれば,

$$u'(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{u_i(\theta) - \bar{U}(\theta)\}^2}{\sum_{i=1}^n 1 - 1}} \quad (2)$$

と書ける。なお, 測定システムの特性より θ に対して n の値は異なる。

2. 4 微粒子供給装置

レーザドップラ流速計による流れの計測では流体中に光を散乱する粒子が必要で、流れへの追従性から流体の比重と同じで径が小さく球状であることが望ましい。一方、強い散乱光を得るためにはある程度粒径を大きくしなければならないが、余り大きくするとドップラ信号の鮮鋭度がなくなる。また、同一振幅の信号を得るために均一粒径のものをを用いた方がよい。このような測定条件に適した散乱粒子とその供給法について報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾がなされているが、本研究では自作したアトマイザにより粘度500cSt、密度968.3kg/m³のシリコンオイルを霧化し散乱粒子として用いた。Fig. 6に散乱粒子供給装置を示す。A部に空気が送られるとパイプCより吸い上げられた溶液がB部のオリフィスで霧化し、F部より散乱粒子を含んだ空気が排出される。Fig. 7は微粒子の顕微鏡写真である。これは、得られる微粒子の粒径を0.3μmから20μm程度と仮定した球形粒子の自由落下の最終速度が2.6μm/sから11.5mm/sであることから、直径が約200mm、高さが350mmの断熱されたアクリル円筒容器に微粒子を含んだ空気を捕集し、底部にA重油を塗ったスライドガラスを24時間放置してサンプルしたものである。直径が1μmより小さい微粒子が明確に現れていないのは使用した顕微鏡の解像度によるものと思われるが、Fig. 7を拡大することにより判別できる粒子について求めた粒径分布がFig. 8であり、平均粒径及び標準偏差はそれぞれ

1.85μm及び0.369μmであった。平均粒径より求められる追従しうる周波数⁽⁹⁾は3%の流速精度で4kHz、角速度は2度の流れ角精度で3.5krad/sである。また、A部への供給圧力が0.4MPaのとき給気流量を0.36m³/minに設定した機関回転数ゼロrpmの定常流試験の場合、データのサンプルレイトは約100kHzであり、このことから粒子濃度は1.3×10¹⁰個/m³程度と考えられる。

3. 実験結果及び考察

測定はFig. 1に黒丸印●で示されるシリンダ中央より排気バルブ側へ10mmだけ離れた測定点において旋回方向流速成分について行った。機関の回転数は350rpmである。なお、機関に潤滑油を供給すると運

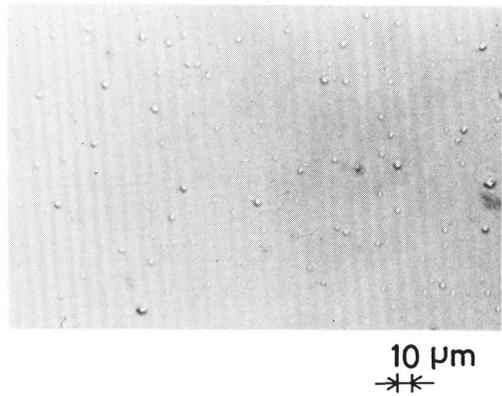


Fig. 7 Photo of silicon oil particles

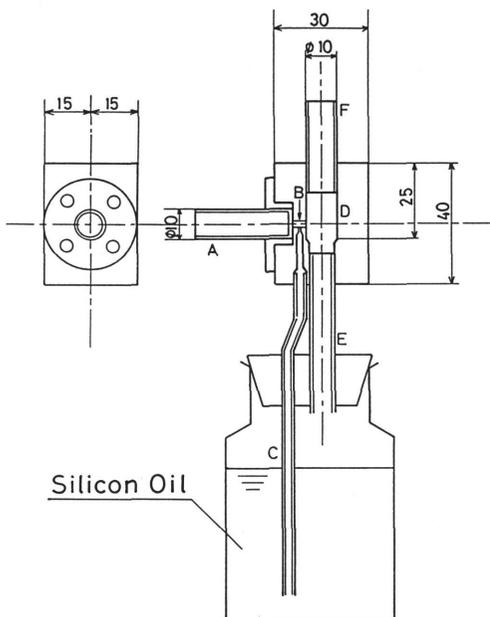


Fig. 6 Seeding generator

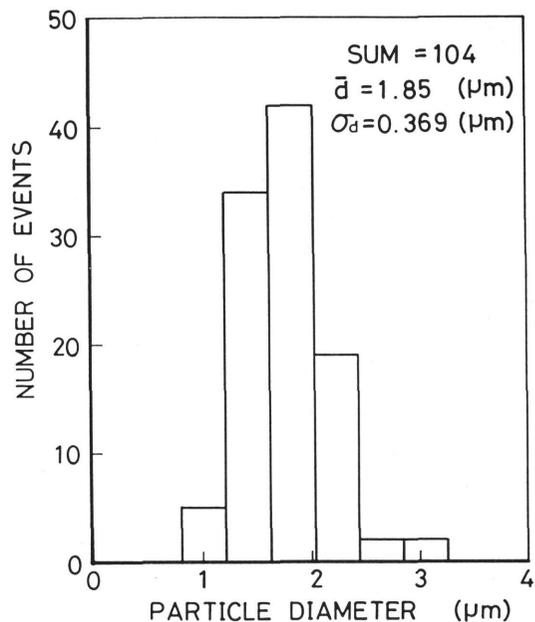


Fig. 8 Particle diameter distribution histogram

転中に測定窓へ油滴が付着し測定の際となるため、潤滑油の代わりにテフロン糸の特殊潤滑剤を摺動部に塗布するとともにピストントップリングを除去して実験を行った。データのサンプルレイトは約700Hzであり、測定点に対して1000点単位で10単位のデータを取得した。10単位の計測時間は約50秒であった。

Fig. 9はクランク角度1度毎に得られた旋回方向流速データの度数変化を吸気行程から圧縮行程にわたって示している。データの総数は10000点である。なお、クランク角度で吸気TDCから37度まで及び323度から圧縮TDCまでの2ヶ所で度数がゼロであるのは、ピストンによってレーザ光が遮断され測定不可能であるためである。吸気行程の初めでデータのサンプル度数は急激に増加しているがピストンがBDCに近づくとともに減少する。圧縮行程の中ほどまでサンプル度数は少ない状態が続き、行程の終わりでは再び度数が急激に増加している。このように、度数はクランク角度に対して一様でなく2点から150点程度まで大きく変化している。

Fig. 10は得られた10000点の流速値を平均ピストン

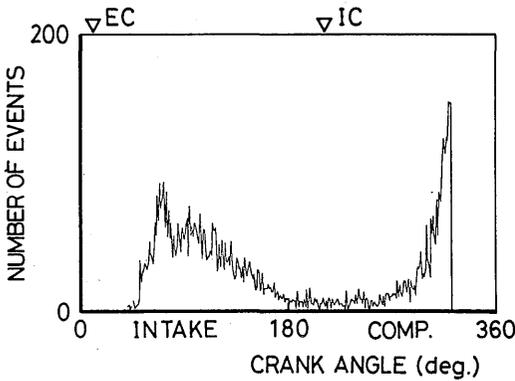


Fig. 9 Number of events versus crank angle

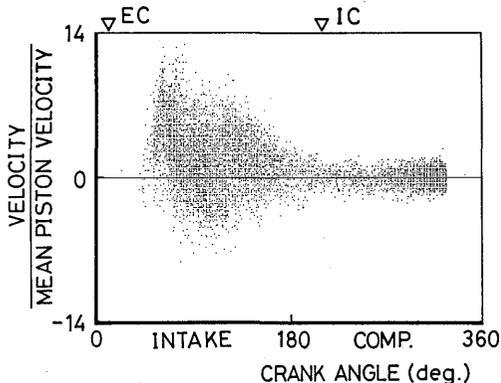


Fig. 10 All the measured velocity data versus crank angle

速度で無次元化しクランク角度に対して全てプロットしたものであり、吸気行程における流速値のばらつきは最大流速の半分程度に及んでいること、またばらつきはデータ度数のすくない圧縮行程の初めで小さく現れていることがわかる。

Fig. 11の破線はクランク角度246度で得られたデータの度数分布であり、実線は244度から248度までの5度の範囲に対する度数分布である。Fig. 11の曲線はそれぞれの分布をガウス分布と仮定した場合であり、度数分布はほぼガウス分布に近い。また、正規性仮説の検定を行った結果有意水準は両者とも5%以内である。これらのことから以下では流速値の度数分布を近似的にガウス分布として取り扱う。(1)式及び(2)式の統計的な計算より求められる平均流速や流速変動の値はデータのサンプル数nがクランク角度 θ に対して異なるから信頼度も異なること、特にデータ数が少ない場合には流速変動を過大評価する可能性があることから、ガウス分布の仮定より90%の信頼区間⁽¹⁰⁾を算出し解析結果の信頼性を確認することとする。

取り扱うクランク角度の範囲を20度まで広げ吸気行程から圧縮行程にわたって度数分布を表示したものがFig. 12である。吸気行程で流速のばらつきが大きいこと、圧縮行程の終わり近くではばらつきは小さくサンプル度数が急激に増加していることが明瞭である。

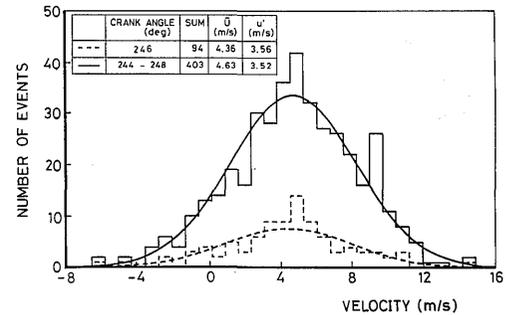


Fig. 11 Velocity distribution histogram

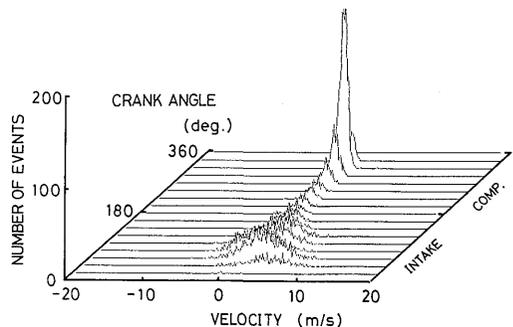


Fig. 12 Measured two dimensional velocity distribution histogram

Fig. 13 はクランク角度に対する平均流速と、その90%の信頼区間の変化を示しており、Fig. 14 は流速変動と、その信頼区間の変化である。また、Fig. 13 および Fig. 14 における点は、各クランク角度ごとに得られたデータから算出された値であり実線は5度にわたるデータが1度の間に現れたとして次式の移動平均による平滑化計算より平均流速 $\bar{U}_5(\theta)$ 及び流速変動 $u'_5(\theta)$ を求めたものである。

$$\bar{U}_5(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} u_i + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} u_i + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} u_i + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} u_i + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} u_i}{\sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} 1} \quad (3)$$

$$u'_5(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} (u_i - \bar{U}_5)^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} (u_i - \bar{U}_5)^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} (u_i - \bar{U}_5)^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} (u_i - \bar{U}_5)^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} (u_i - \bar{U}_5)^2}{\sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} 1 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} 1 - 1}} \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} u_i &= \sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} u_i(\theta-2) + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} u_i(\theta-1) + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} u_i(\theta) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} u_i(\theta+1) + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} u_i(\theta+2) \\ \sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} (u_i - \bar{U}_5)^2 &= \sum_{i=1}^{n_{\theta-2}} \{u_i(\theta-2) - \bar{U}_5\}^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta-1}} \{u_i(\theta-1) - \bar{U}_5\}^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\theta}} \{u_i(\theta) - \bar{U}_5\}^2 + \sum_{i=1}^{n_{\theta+1}} \{u_i(\theta+1) - \bar{U}_5\}^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\theta+2}} \{u_i(\theta+2) - \bar{U}_5\}^2 \end{aligned}$$

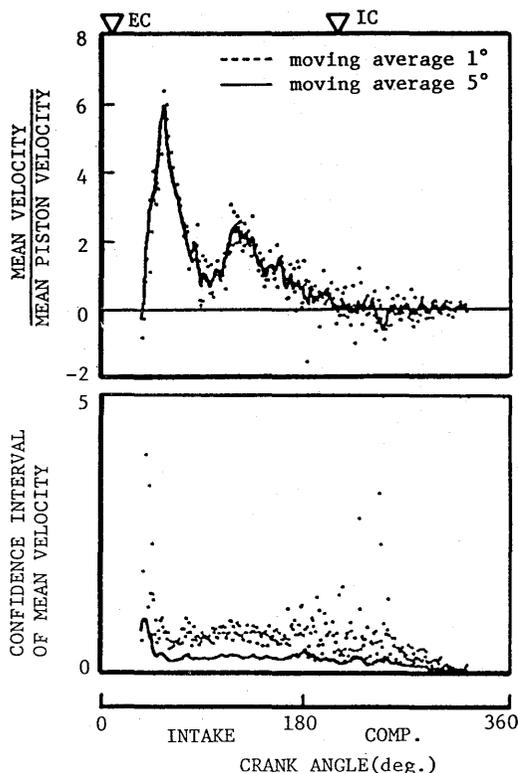


Fig. 13 Mean velocity and confidence interval

である。

平均流速は吸気行程中に増加と減少を2回繰り返しており吸気行程初期での変化は急激である。一方、圧縮行程では緩やかにゼロに近づいている。また、サイクルにわたるこの大きな流速の変化に比較的短い周期で低振幅の流速変化が重なっている。平滑化を行わない場合には平均流速の信頼区間は吸気行程のごく初め及び圧縮行程の一部で大きくなっており、これはFig. 9の度数分布で示されたようにサンプル数が少ないためであると思われる。この部分を除けば、信頼区間は吸気行程及び圧縮行程のほぼ全領域で平均ピストン速度の1.5倍程度であり、圧縮行程の終わりではさらに小さくなっている。流速変動は吸気行程前半で増加し後半では減少している。ピストン速度及び吸気バルブ開度がほぼ最大となるクランク角度が90度付近では平均流速は一旦小さくなっているにもかかわらず、流速変動は吸気行程における最大流速の半分程度と大きい。一方、圧縮行程ではほぼ一様に低いレベルであり吸気行程とは様子が異なる。また、流速変動の信頼区間は平均流速の場合とほぼ同様の結果である。このようにクランク角度に対してサンプル度数が異なっても平

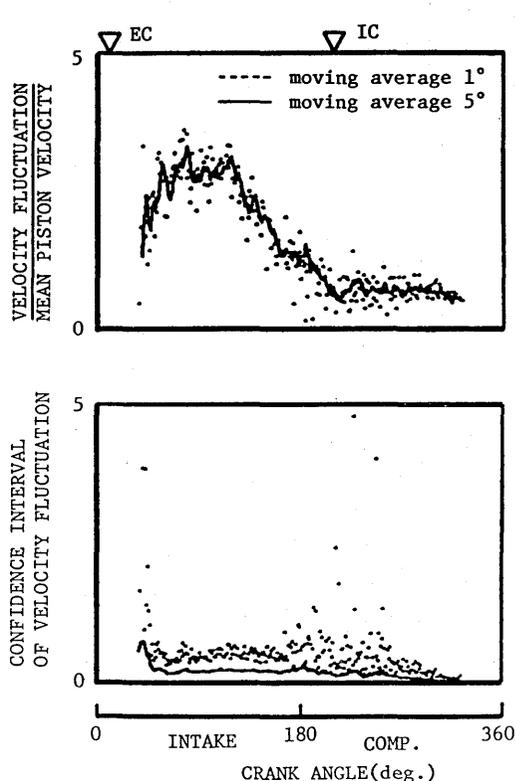


Fig. 14 Velocity fluctuation and confidence interval

均流速及び流速変動は信頼性を失うことなく求められ、サンプル度数が不足であれば信頼区間の表示に現れ確認ができる。さらに、5度にわたる移動平均によるデータの平滑化処理を行うと平均流速変化及び流速変動変化ともに滑らかとなり平滑化を行わないデータのはほぼ中央をフィットしており、信頼区間は半減し平均ピストン速度のはほぼ20%以下となっている。

4. まとめ

周波数トラッカを用いたレーザドップラ流速計からの有効なデータのみサンプルシオンラインで結果をモニタ可能な計測システムを開発して、ボア102mm、ストローク106mmの実機の直接噴射式ディーゼル機関のシリンダヘッド下面から13mm、シリンダ中央より排気側へ10mmだけ離れた点における旋回流速成分を測定した。統計的処理により求められる平均流速及び流速変動について、その信頼区間を算出することにより信頼性を検討し以下の結果を得た。

- (1) 1度から5度のクランク角度の範囲における流速の度数分布はガウス分布に近い。
- (2) クランク角度に対してサンプル度数は大きく異なるが、吸気行程から圧縮行程にわたり10000点のデータを取得することにより信頼性のある平均流速及び流速変動が求められる。また、サンプル度数が不足であれば信頼区間の表示に現れ確認ができる。
- (3) 流速変動は吸気行程ではクランク角度とともに増大し最大平均流速の半分程度に達して再び減少するが、圧縮行程ではほぼ一様に低いレベルである。
- (4) クランク角度で5度にわたる移動平均による平滑化を行うと、平均流速及び流速変動の90%の信頼区間は平均ピストン速度のはほぼ20%以下と低い値が得られた。

なお、信頼区間の計算等のデータ解析には長崎大学情報処理センタのFACOM M360を使用し、Fig. 13及びFig. 14の計算及び図形出力を行うに要した演算時間は約20秒であった。

終わりに、供試機関を御提供頂いたヤンマーディーゼル株式会社、ならびに実験に御協力頂いた当時の卒

研生の荒木淳君、近藤健太郎君、田崎博君に謝意を表します。また、微粒子の顕微鏡による観察に御協力頂いた機械工学第二学科の浦晟教授、中嶋明助手、角度カウンタの製作についてご教示頂いた同学科の石松隆和助教授、および大量データの大型計算機への転送処理に当たり御協力頂いた共通講座の金丸邦康助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 松岡, 永倉, 河合, 青柳, 神本, レーザ流速計によるディーゼル機関シリンダ内の空気流動の計測, 日本機械学会文集B編, 47巻422号, 1981
- 2) J. Katoh, Y. Ohkubo, M. Ohtsuka, K. Sugiyama, LDV Measurement of Swirl Flow in Internal Combustion Engines, Proceedings of COMODIA, 1985
- 3) C. Arcoumanis, A. F. Bicen, J. H. Whitelaw, Measurements in a Motored Four-Stroke Reciprocating model Engine, Fluid Mechanics of Combustion System, ASME, 1981
- 4) W. F. Ball, C. N. F. Waterhouse, Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct-injection diesel combustion chamber, IMechE, 1983
- 5) T. M. Liou, M. Hall, D. A. Santavicca, F. V. Bracco, Laser Velocimetry Measurements in Valved and Ported Engines, SAE 840375, 1984
- 6) 内田, 金丸, 市販ファイルコンバータの使い勝手とそのサポートプログラム 長崎大学情報処理センタ, センタレポート, 第5号 1984
- 7) A. Melling and J. H. Whitelaw, Optical and Flow Aspects of Particles, Proc. of the LDA Sympo. Copenhagen 1975
- 8) B. Y. H. Liu and K. W. Lee, An aerosol generator of high stability, AIHA Journal, 1975
- 9) 植木, 速水, 極低速沈降速度の自動計測について, 九州大学生産科学研究所報, 74号, 1983
- 10) J. S. Bendat, A. G. Piersol, RANDOM DATA : Analysis and Measurement Procedures, 1971, John Wiley & Sons, Inc.