

筒内現象解析用可視化エンジンの紹介

Introduction of Optically Access Engine to Investigate in Cylinder Phenomena

佐々木 隆*	吉田 一夫*	浦田 泰弘*
Takashi SASAKI	Kazuo YOSHIDA	Yasuhiro URATA
大野 敏久*	石井 清*	
Toshihisa OHNO	Kiyoshi ISHII	

要 旨

筒内における空気の流動や燃焼の理解および数値シミュレーションの検証のためには筒内の現象を直接観察する必要があり、それぞれの目的に合せて、1.5Lシビック用、2.2Lアコード用およびディーゼル用の合わせて5種類の可視化エンジンを開発してきた。

ここでは、それらの可視化エンジンの使い方、構造および特有の技術について述べ、さらにこれを使用した筒内現象解析例を紹介する。

ABSTRACT

It is necessary to observe the in-cylinder phenomena directly for understanding in-cylinder air motion, combustion and evaluation of the numerical simulation. For each purpose, we have developed five types of optically access engine for 1.5L-Civic, 2.2L-Accord and Diesel engine.

This paper describes the usage, structure and peculiar technique in design, and introduces the examples of the analyses using these engines.

1. はじめに

エンジンの性能向上には、まず燃焼室内で起きている現象を知り理解することが必要であり、そのためには筒内の現象を直接に観察ができるエンジン(以下、可視化エンジンと称す)や測定法などの開発が必要とされている。一方数多くの数値シミュレーションソフトウェアが市販され、設計の開発期間短縮の有効な手段となってきたが、まだ燃焼室内の現象を正確に評価できる段階には至っていない。これは、設計用のツールとして開発されているために計算時間の制約から様々な現象を比較的簡単なモデルで表わしており、完全には現象を現しきれていないためである。したがって新しいエンジンに対する各モデルの妥当性の検証、各ソフトウェアの使用範囲や制限についての確認およびそれぞれのエンジンの特徴に合わせたモデルの作成のために、筒内現象の解析が重要となっている。

従来の筒内現象の測定は、高速度のフィルムカメラやビデオカメラによる火炎伝播、燃料噴霧の撮影やLaser

doppler velocimeter(LDV)による流速測定が主であったが、近年のレーザ可視化技術の発達やデータ処理能力の向上により、より詳細な空気流動、種々のガス濃度、温度分布やラジカル基の濃度分布などの二次元測定が可能となり、測定領域についても筒内全域にわたっての可視化が求められるようになってきた。これらの測定例としては、火炎伝播の測定¹⁾、空気流動の測定²⁾、燃料噴霧挙動の測定³⁾、混合気分布の測定⁴⁾、初期火炎の可視化と点火プラグ部の熱損失の数値計算とを合わせた初期火炎の成長について解析例⁵⁾など多数が報告されている。

当社においても火炎伝播⁶⁾、空気流動⁷⁾、燃料噴霧挙動⁸⁾、混合気分布⁹⁾、点火プラグ部の熱損失¹⁰⁾、希薄燃焼時のサイクル変動¹¹⁾などについて報告してきた。ここでは、これらの観察に用いられてきたFig.1に示す可視化エンジンについて、構造とその特有技術および可視化エンジンを使用した解析例について紹介し、より広範囲なエンジン研究に役立つことを望む。

2. 可視化エンジンへの性能要求

2. 1. 測定項目からの要求

筒内における燃焼に関わる現象は、Fig.2に示す様に火炎の伝播、燃料噴霧の挙動、混合気や残留ガスの濃度分布、空気の流動などがある。これらの測定項目を、可視

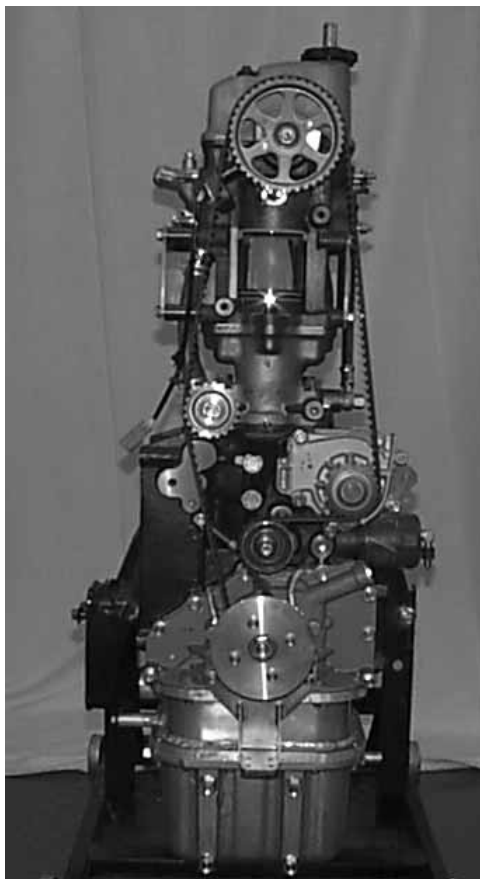


Fig.1 Optically access engine

化エンジンへの要求として整理しTable 1に示す。可視化エンジン特有の要求項目は、運転条件と測定のための可視化領域である。運転条件については、燃焼解析のための可視化が主目的なので部分負荷の40km/hクルーズ運転時を基準とし(以下、この運転条件を部分負荷と称す)、アイドリング状態からエンジン回転数2000 rpmの全負荷状態までおよび正味30分の測定時間に対して1時間以上の連続ファイアリング運転が要求項目となる。

可視化領域への要求には、①初期火炎の形状、吸気バルブ近傍の燃料噴霧、残留ガスや混合気濃度分布などの測定については燃焼室の上部の点火プラグや吸気バルブ近傍における水平および垂直断面の可視化、②ノッキングを含む火炎伝播、燃料の噴霧の拡がりや液滴の径と速度などの測定に対しては燃焼室を含むシリンダ上部にお

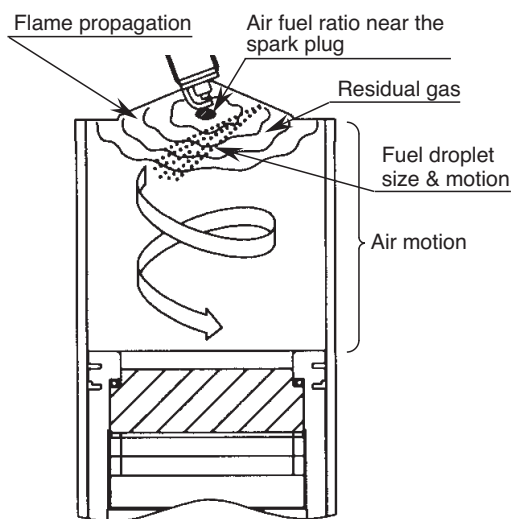


Fig.2 Visualization items in engine cylinder

Table 1 Measurement demand for optically access engine

Measurement item	Method	Light location	Camera location	Measurement timing	Test condition	Continuous running time	Load	Maintenance interval
Air fuel ratio	LIF,CARS	Horizontal and vertical laser sheet(or beam) into the combustion chamber near the spark plug	Bottom and side view	Ignition timing	Firing	15 min.	Partial	1 Month
Flame propagation	High speed camera	Not necessary	Bottom and side view	Flame propagation period	Firing	15 min.	Partial	1 Month
Knock	High speed camera	Not necessary	Bottom and side view	Flame propagation period	Firing	1 min.	Full	1 Month
Fuel droplet motion (velocity and diameter)	Laser sheet	Horizontal and vertical laser sheet into the combustion chamber near the inlet valve	Bottom and side view	Induction stroke	Firing	15 min.	Partial	1 Month
Air motion and velocity	Laser sheet PDV,LDV	Laser sheet(or beam) into the whole region of cylinder	Bottom and side view	Induction & Compression stroke	Motoring Firing	15 min. 1 min.	— Partial	1 Week

ける水平断面の可視化、③空気流動の測定は吸入から圧縮、燃焼行程における筒内全域にわたる水平および垂直断面の可視化、などがある。

Fig.3に、上記可視化領域①から③の要求に対する観測用窓や撮影機器位置(測定の光路)の略図および“Bottom View”、“Side View”などの呼称を示す。また火炎伝播などの発光を伴う現象の測定には高速度カメラなどの機器からの光路だけを考えればよいが、発光を伴わない場合にはレーザシート等の照明用の光路も必要となり合せ示した。

①の燃焼室上部での測定項目のうち垂直断面の撮影は、シリンダヘッドの側面に窓(Side window)を設け、これを透してカメラAによって撮影できる。さらに照明が必要な場合には、レーザシートCをシリンダブロックに固定した鏡で反射させ、ピストン上部に設けた窓(Piston window)に導き燃焼室上部を照明すればよい。また水平断面での現象の場合には、点火プラグ下側の水平断面へレーザシートAを入射しカメラCを用いて撮影すればよい。

②のシリンダ上部における火炎の伝播や噴霧の形状のように水平方向へ広がる現象に対しては、カメラCを用い、レーザシートAあるいはBを用いて水平断面を照射し測定すればよい。またLDV、PDV(Phase Doppler Velocimeter)等による液滴の速度、粒径の計測では、

LDV、PDVなどの装置をカメラAもしくはBの位置に設置し測定を行う。

③の空気流動の測定におけるカメラやレーザシートについては②の場合と同じであるが、筒内全域を観察するために透明な石英材のスリーブが使用され、また吸入空気には微粒子が混入されるので長時間のファイアリング運転は難しく、またファイアリング運転で測定する必要性も少ない。したがって可視化エンジンに必要とされる観察用あるいは照明用の窓は、シリンダヘッドの側面部の窓、シリンダ上部の透明なシリンダスリーブ、筒内全部が透明なシリンダスリーブおよびピストン頭部の窓である。

2. 2. 可視化エンジンの基本構造と種類

前項の①から③の測定領域の要求を一台のエンジンでまかなうことはできず、シビック1.5L・4気筒エンジンを基とし、Fig.4に示す三種類の可視化用単気筒エンジンを開発した。これらのエンジンの基本構造は、シリンダブロックなどの下廻りを共通化し、燃焼室側とシリンダブロック側に2つのピストン部分があり燃焼室側の頭部に観測窓をもつ延長型ピストン(Extended piston)、シリンダヘッドとシリンダブロックを繋ぐためのスペーサブロックおよびシリンダヘッドより成り立っている。石英製の窓やシリンダスリーブの破損を防ぐためには、エン

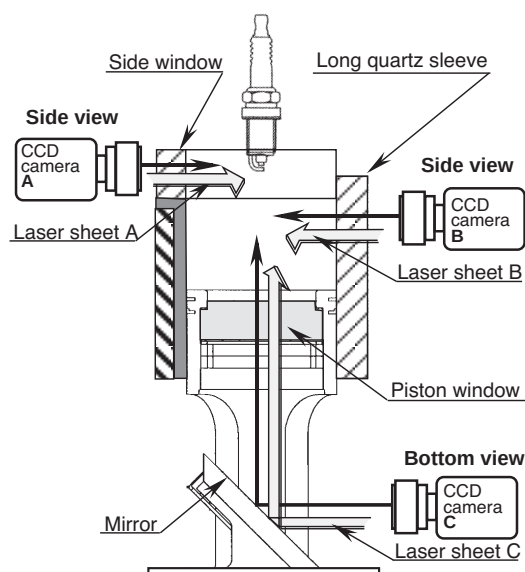


Fig.3 Camera and laser sheet position for visualization

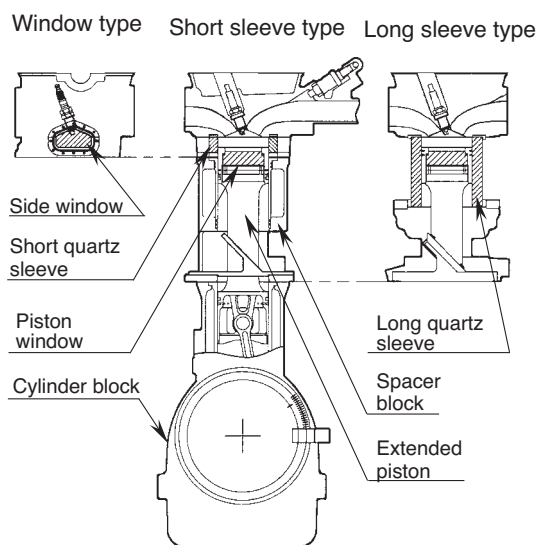


Fig.4 3 types of optically access engine

ジンの組み立てや運転時に生じるひずみを極力小さくする必要があり、シリンダヘッド、スパーサブロックおよびシリンダブロックは鋳鉄材を用い、剛性の確保に留意した。次に各エンジンの概要について述べる。

ウインドウタイプのエンジンは、シリンダヘッド横に窓(Side window)を取り付け、点火プラグおよび吸排気バルブ周辺の現象の可視化のために開発された。垂直方向の測定視野は、燃焼室のペントルーフ上面からピストン上死点位置より13.4mm下までである。また水平方向についてはペントルーフ部の全幅である52mmとした。

ショートスリーブタイプのエンジンは、火炎伝播や筒内での燃料液滴の挙動などを測定するために開発し、シリンダ上部に円筒形の窓(Short quartz sleeve)を設け、ピストン上死点位置より下側へ22mmまでの観察ができる。このエンジンは、燃焼室形状が対象となるエンジンとほぼ同一にできるため、圧縮比も対象としたエンジンに近い9.2が得られている。ウインドウタイプと同様に石英窓部がピストンリングと接触しないため、1時間以上の連続したファイアリング運転が可能である。

ウインドウタイプとショートスリーブタイプのエンジンのシリンダヘッドの木型は共通とし、機械加工によって作り分けている。シリンダヘッド部は、ピストン上死点位置よりシリンダブロック側へ延長されている。この延長部へ“short quartz sleeve”や“side window”が取り付けられるため、これら二種類のシリンダヘッドを用いることにより、上はペントルーフ上面から下はピストン上死点位置より下方向22mmの領域の観察が可能となる。

ロングスリーブタイプのエンジンは、主に吸入および圧縮行程中の筒内全域にわたる空気および燃料の挙動を測定するために開発され、鋳鉄製のシリンダスリーブの代わりに石英製のシリンダスリーブ(Long quartz sleeve)が用いられた。このためシリンダスリーブ表面を摺動するピストンリングの材質として、PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)を用い、モータリングでは1時間以上の測定、ファイアリング運転については1分間隔での実験が可能である。

上記の可視化エンジン以外に、アコード用2.2Lおよびディーゼル用可視化エンジンを開発した。これらのエンジンは強化した共通の下廻りを使用し、トルク変動による振動対策として二次バランサーを取り付けた。これらのエンジンの諸元をまとめてTable 2に示す。

3. 可視化エンジンの特有技術

3. 1. 観察・照明用窓の設置法

各窓の設置に共通して留意した点は、割れ防止のために窓材と金属部品が直接接触することを避けることと、圧縮比を実エンジンに近づけるため窓の設置による無駄容積をできるだけ少なくすることである。次にそれぞれの窓の設置法について説明する。

3. 1. 1. ピストンウインドウ

Fig.5にピストン頭部の構造を示す。ピストン下方から燃焼室内を観察するため、ピストンを高さ方向に延長し、頭部には石英製の窓(Piston window)を取り付けた。ピストン頭部およびウインドウの設計で留意した点は、窓の割れ防止と燃焼の圧力振幅に耐えるシール性の確保である。

窓の割れ防止として図のピストン頭部拡大図においてピストンウインドウのAで示す部分の径の拡大、ウインドウとピストン間のクリアランスの増加およびピストンウインドウのピストンに対する半径方向の位置決めのため、窓の組み付け時に両者の間に厚さ0.05mmのゲージを入れ、取り付け時の窓の偏りの防止等を行った。これは開発初期のファイアリング運転中に、A部を起点とした割れが生じたことに対する対策である。

シール性確保のため窓材の上下に二枚のガスケットを使用し、上側ガスケットによる燃焼ガスのシール性確保のため、ガスケットのばね定数は下側に対して大きな値を設定した。Fig.6に示す上下二枚のガスケットの荷重に対するひずみ特性で説明すると、締め付けの荷重により上下のガスケットにはAまで荷重が加わり、この状態で燃焼による荷重が加わると下側のガスケットは更にBまでひずみが増加する。この分上側のガスケットのひずみは開放され、上側ガスケットの荷重はCまで減少する。

Table 2 Engine specifications

	Civic 1.5L type			Accord 2.2L type	Diesel type
Engine type	Water cooled 4stroke single cylinder			←	←
Bore × Stroke (mm)	φ75.0 × 81.5			φ85.0 × 95.0	φ80.0 × 80.0
Displacement Volume (cc)	360			539	402
Window type	Window	Short sleeve	Long sleeve	Window	Short sleeve
Window material	Quartz	Quartz	Quartz	Quartz	Sapphire
Visualization area	Combustion chamber	Upper part of cylinder	Whole area of cylinder	Combustion chamber	Upper part of cylinder
Compression ratio	7.9	9.2	9.2	6.5	19.5

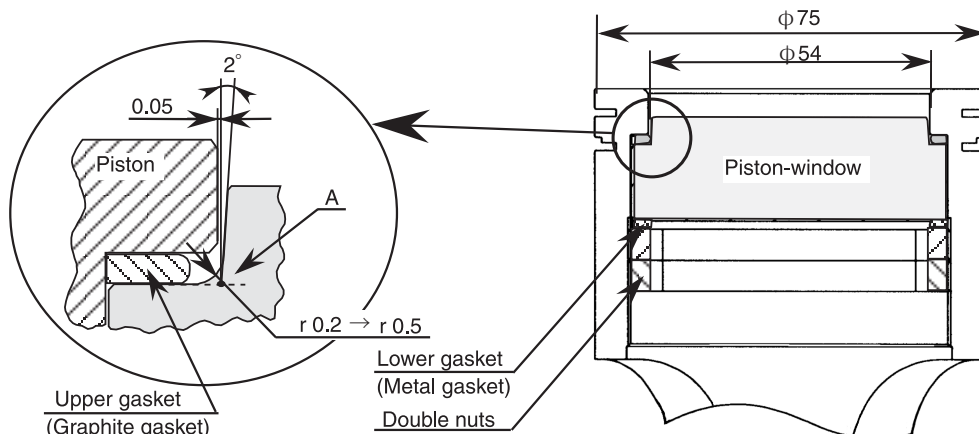


Fig.5 Piston window mounting onto the piston

この状態で燃焼圧をシールするのに必要な荷重Dを上回る必要があるが、上側のガスケットのばね定数を下側の値より小さく設定することにより、全負荷相当の燃焼圧が加わった場合も、安全率は3以上を確保できている。

3. 1. 2. サイドウィンドウ

点火プラグ近傍およびピストン上死点付近での筒内現象を解析するため、Fig.7に示す様に燃焼室側方に観測用窓を取り付けた。窓の設置にあたり、窓割れ防止のための固定法と圧縮比の確保の二点を留意した。サイドウイ

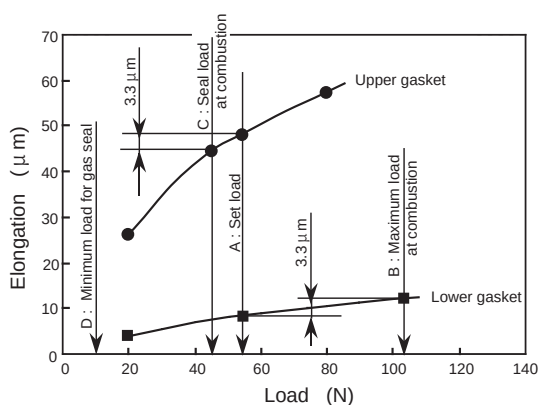


Fig.6 Different characteristics of upper and lower piston-window gasket for gas seal

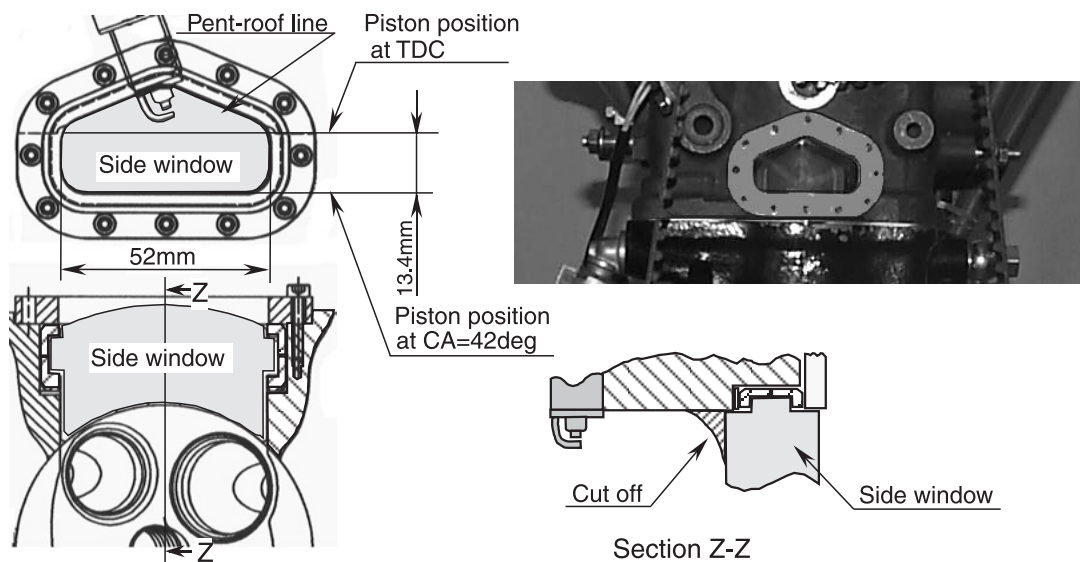


Fig.7 Visible area and photograph of side window

ンドウは、Fig.8に示す様にサイドウインドウのフランジ部をインナフレームとアウトフレームで挟み、このフレームをマウンティングフランジを介してシリンダヘッドへ固定した。この固定方法により、窓の不均一な締め付けや、シリンダヘッドのひずみによる偏荷重が窓材に加わるのを防ぐことができ、窓の割れを防止できた。

ウインドウタイプのエンジンは横方向からの観察のため、Fig.7のZ-Z断面の斜線部で示す燃焼室隅肉を削除した結果、圧縮比が基となるエンジンの9.3に対して7.7と低くなった。圧縮比をなるべく近付けるため、Fig.8に示す

様な厚さの異なるインナフレームを数種類用意し、最適な内面位置が得られるフレーム厚さを適宜選択するなどの対策を行い、圧縮比を7.9まで高めた。

3. 1. 3. ショートクォーツスリーブ

ショートスリーブタイプはシリンダ上部の可視化を行うため、Fig.9に示すようにシリンダヘッドを下方に29mm延長し、この部分に円筒形の窓(Short quartz sleeve)を挿入する構造とした。この構造とクォーツスリーブ上下のガスケットにより、シリンダヘッド締め付け時にクォーツスリーブへ過大な荷重が加わることを防ぎ、割れ防止とした。シリンダ上部の変更に合わせ、ピストンの形状もウインドウタイプと同様にピストンリング位置を下げる変更を行った。

シリンダスリーブ上を摺動するピストンと、ヘッドに固定されているクォーツスリーブのクリアランス管理は、クォーツスリーブのシリンダヘッドへの位置決め用のロアプレートとシリンダヘッドのボアセンタへの位置決め用のノックとによって行われる。このロアプレートには位置決めの他にガスケットとしての機能も要求されるため精度管理が難しい。このためロアプレートはPTFEをコーティングしガスケットとして機能させた上で、クォーツスリーブと接触する水平および垂直の二面に仕上げ加工を行い、位置決め精度の向上とガスケットとしての機能を両立させた。

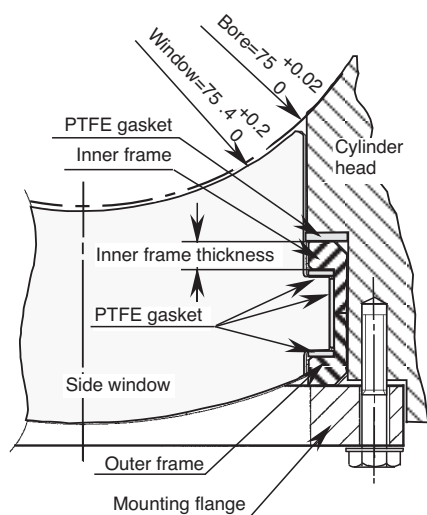


Fig.8 Side window mounting to the cylinder-head

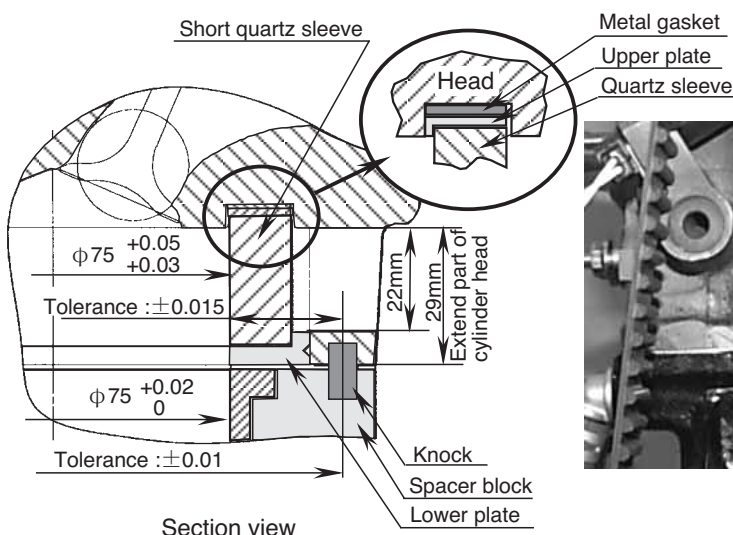
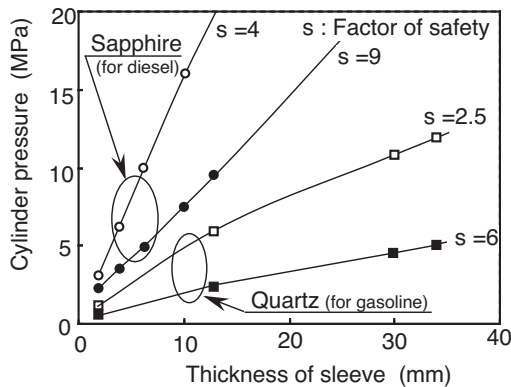


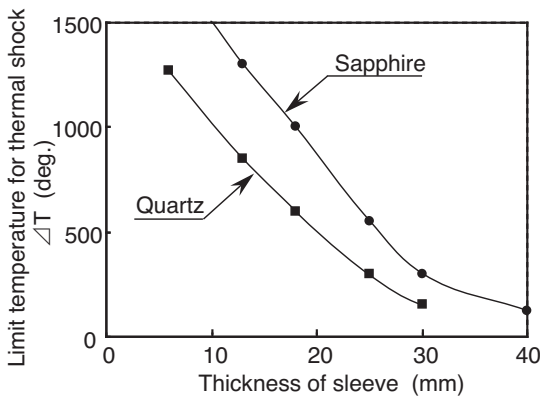
Fig.9 Short quartz sleeve mounting to the cylinder-head

ショートクォーツスリーブの厚さの設計は、筒内圧力による引張りとせん断応力およびスリーブの内外温度差による熱応力を考慮する必要がある。Fig.10aは筒内圧力とスリーブ材の厚さの関係を、Fig.10bにはスリーブの内外面温度差に対する窓材の厚さの関係を、それぞれ石英およびサファイアについて示した。高い筒内圧力で使用するためには窓材を厚くする必要があるが、厚さが増すと熱応力が増加し使用可能な厚さに限界があることを示している。

ガソリンエンジンの場合、部分負荷における最大筒内圧力を2.5MPa、安全率を6と設定するとスリーブ厚さは13mmとなる。この厚さでの全負荷運転時の安全率は、最大筒内圧力を6MPaと設定すると2.5となる。ファイアリング運転時のスリーブ内外面の温度差を200℃と仮定すると、Fig.10bより石英の使用可能な最大厚さは27mmで



(a) Thickness of optical sleeve for cylinder pressure



(b) Thickness of optical sleeve for thermal shock temperature

Fig. 10 Thickness of optical sleeve for cylinder pressure and thermal shock temperature

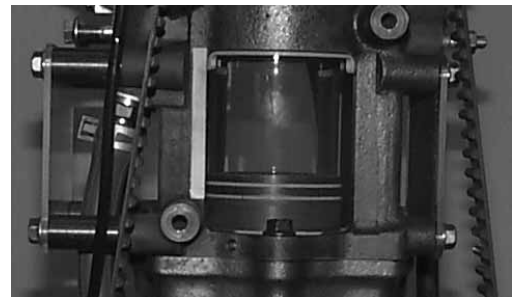
あり、温度差内部応力に対しても十分に余裕がある。

ディーゼルエンジンでは、部分負荷運転条件の最大筒内圧力を7.5MPaと設定した場合、ショートクォーツスリーブの厚さを27mmとしても安全率は3.5であり、常用運転条件の安全率としては十分でない。従って、スリーブに厚さ10mmのサファイア材を用い、部分負荷時の安全率を9、また全負荷運転の最大筒内圧力16MPa時においても安全率を4とした。サファイア材はコストが高く、その硬度の高さにより加工時間も長くなるため、ガソリンタイプのエンジンの窓材には石英を使用している。

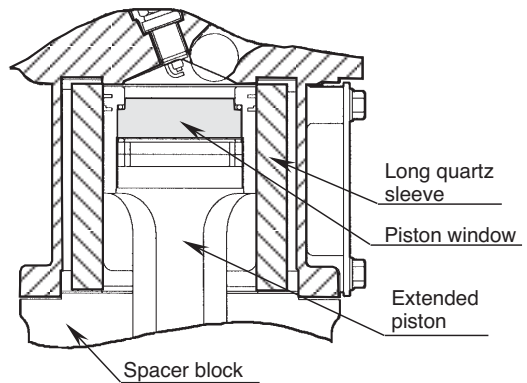
3. 1. 4. ロングクォーツスリーブ

ロングスリーブタイプのエンジンにおけるロングクォーツスリーブの設置は、Fig.11に示すようにクォーツスリーブの長さの違いはあるがショートクォーツスリーブの場合とほぼ同じである。

ただしロングクォーツスリーブの全長は102mmと長いので、シリンダヘッドを次のように変更した。締付けや燃焼圧力による偏荷重を避けるため、シリンダヘッドは



Photograph



Section view

Fig. 11 Long quartz sleeve mounting to the cylinder head

ピストン上死点位置よりブロック側に106mm延長され、この延長部分はスリーブへの偏荷重を防ぐために剛性を大きく取るように留意し、締め付けは通常の四本のボルト間にさらに四本のボルトを追加することにより、面圧の均一化を図った。

エンジンの四方向からの観察のために、スリーブ外側のウォータジャケットは省かれている。このため延長されたシリンダヘッド部は四隅の柱状の形となっており、ロングクォーツスリーブはこの柱の内側に位置決めされている。

3. 2. 光学部品の汚れ防止

可視化エンジンの運転時間は、エンジンの耐久性と光学部品の汚れで決まるため、汚れ防止は可視化エンジンの主要課題の一つとなっている。光学部品の汚れの原因は、燃料と潤滑油によるものとに分けられる。

硫黄分や高沸点成分の割合が高い燃料を用いると、可視化用の窓やスリーブ壁面に燃焼生成物が付着しやすく長時間の測定が出来なくなるので、性状管理された国内の無鉛レギュラガソリンを用いている。

潤滑油による光学部品への汚れ防止のためには、シリンダスリーブとピストンリング間の無潤滑化、クランクケースからのオイル上がりおよびシリンダヘッドからのオイル下がりなどの対策を行った。これらの対策により、部分負荷状態では6時間以上の実験が可能となった。これらの対策について以下に述べる。

3. 2. 1. スリーブとピストンリング間の

無潤滑化

スリーブには、ウインドウタイプやショートスリーブタイプで用いる鋳鉄スリーブとロングスリーブタイプで用いる石英スリーブがある。無潤滑運転に於いて、最も適する材料の選定をテストピースによる摺動試験により行った。摺動試験では、回転するスリーブ材の上にピストンリング材を押し付け、その時の焼け付き荷重を測定し、材料の比較を行った。

鋳鉄系スリーブの摺動試験には、無潤滑運転に対する耐焼け付き性が高いと考えられる四種類のセラミック系材料を鋳鉄のテストピースに溶射し使用した。摺動試験の結果、Fig.12に示すようにスリーブ材としてタングステンカーバイト系(WC)、ピストンリング材としてモリ

ブテン系(C-Mo-Fe)の材料の組み合わせが、最も高い焼け付き限界荷重が得られたため、この組み合わせにて実機テストを行った。実機テストでは、モータリング運転に於いて最大圧縮圧によりリング部からの漏れ評価を行い、ファイアリング運転で耐焼け付き性のテストを行った。この結果、モータリングでの最大圧縮圧は基となったエンジン並みの値が得られ、ファイアリングでも運転時間など、測定項目からの要求を満たすことができた。

筒内全域の可視化を行う場合、石英スリーブ表面をピストンリングが摺動することは避けられないため、無潤滑状態に於いてスリーブ表面に傷がつかずに、圧力をシールするピストンリング材の選定を、同様の単体摺動試験にて行った。この結果、1.2mm厚さのスチールリングの外周部にPTFEコーティングを施し、バレル形状に成形したものが最も適していた。モータリング時の最大圧縮圧はベースエンジンと同等の値となり圧力のシール性が確認され、加えて約1分間隔のファイアリング運転が可能なが確認出来た。

3. 2. 2. オイル上がり対策

クランクケース側のピストンリングの摺動によって、シリンダスリーブ上のオイルが掻き上げられ、ピストンウインドウの外側および反射鏡が汚され観察の妨げとな

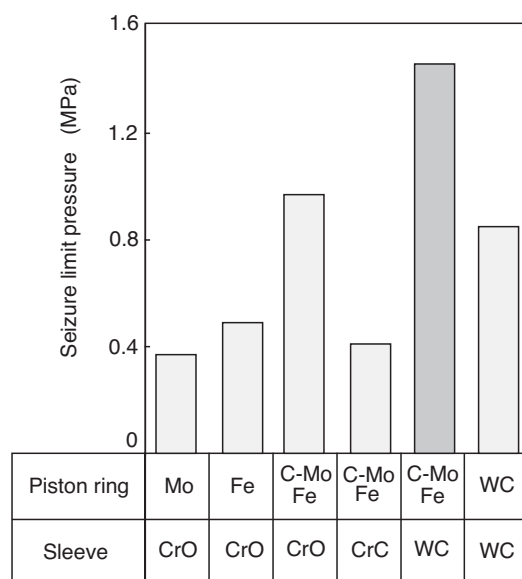


Fig.12 Seizure limit pressure of piston ring and sleeve material combination

る。下側のピストンリングによって掻き上げられるオイルは、クランクケース容積を増加し、さらに負圧ポンプによってクランクケース内を常に負圧に保つことにより対処した。

3.2.3. オイル下がり対策

シリンダヘッドの吸気および排気バルブのステムシール部より、バルブガイドを通して燃焼室へ入るオイルによる光学系部品への汚れは、ファイアリング運転時にはオイルが燃焼するためそれほど問題とならないが、モータリング運転時には顕著である。この対策としてバルブステム部に固体潤滑材を10 μ m塗布することにより径を太くし、合せてステムシールの管理巾を厳しく設定することでオイル漏れ量の上限値を1/3に抑えた。

3.3. 無潤滑での運転時間

ファイアリングでの連続運転可能時間は、負荷や回転数により異なり、Fig.13に示すピストントップランド部の温度測定結果と、リング部の耐久性に相関があることが実験上確認されたことより、この温度を目安として各種運転条件での連続運転可能時間を決定した。Fig.13aは、1500回転で負荷を変化させた場合のピストントップランド部の温度を示し、スリーブとしてセラミック溶射スリーブを使用した場合と、クォーツスリーブを使用した場合を示す。クォーツスリーブを使用した場合のトップランド部温度はスリーブが無冷却であるため、冷却水

により80度に冷却されているセラミック溶射スリーブに対して約100度高い値になっている。Fig.13bは、連続運転時間が負荷により変化するピストントップランド部温度により制限されることを示し、セラミック溶射ピストンリングとPTFEコートリングを使用する場合の連続運転時間を示す。例えば、共にセラミック溶射を行ったピストンリングとスリーブの組合せの場合、Fig.13aより、部分負荷条件の負荷が20%の場合、トップランド部の温度は約130度であり、この場合の連続運転時間はFig.13bより約1時間となる。

次に、ピストンリング等を交換する必要があるメンテナンスインターバルは、代表的な部分負荷条件で約100時間である。このスリーブ材とピストンリング材の組み合わせの問題点は50時間以上の長い慣らし時間が必要なことであり、現在は部分負荷運転に限りPTFEコートリングを使用している。

4. 可視化エンジンの使用例

ここでは可視化エンジンを用いた解析例として、混合気の濃度分布、燃料噴霧挙動および空気速度の測定結果を紹介する。エンジンの運転条件は40km/hクルーズ相当の負荷とし、Fig.14に代表的な計測システムを示す。

4.1. 混合気の濃度分布測定

ウインドウタイプの可視化エンジンの使用例として、

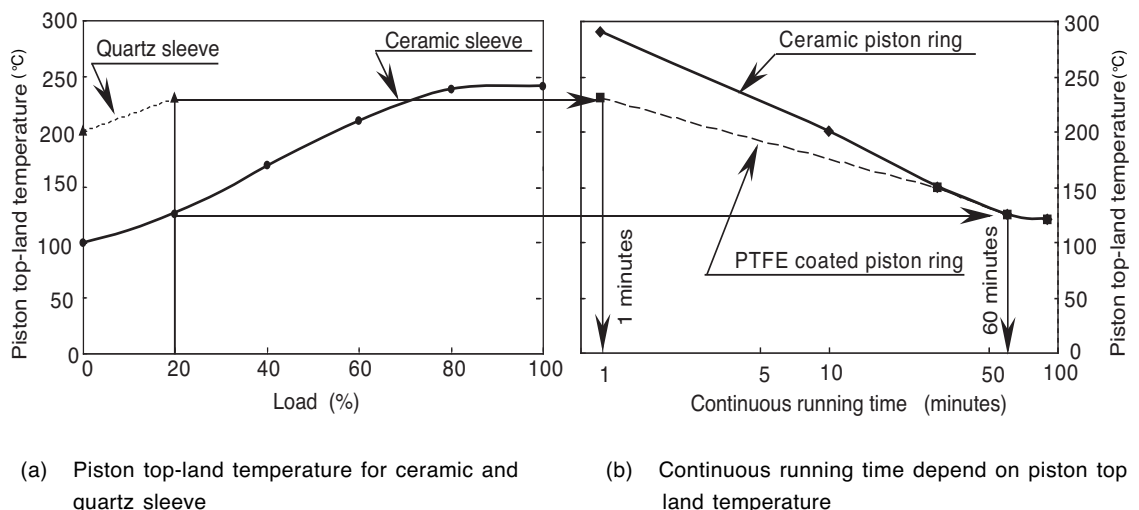


Fig.13 Continuous running time of optical access engine depend on engine load

点火プラグ近傍の混合気濃度分布の測定例⁹⁾を紹介する。濃度測定にはLIF(Laser Induced Fluorescence)法を用いた。LIFは強力な紫外のレーザー光により燃料(もしくは燃料に添加した蛍光材)を励起し、これより発する蛍光を測定することにより混合気濃度を求める手法である。レーザーにはエキシマレーザー(発振波長は308nm)を使用し、これを厚さ0.5mmのシート状にし、Fig.15に示すようにサイドウィンドウを通して点火プラグ下6mmの位置に照射した。レーザー光により励起された燃料からの蛍光は、ピストンウィンドウを通してイメージインテンシファイヤ付きCCDカメラにより測定される。

Fig.16に燃料の噴射時期を変化させた場合の、点火時期における混合気の濃度分布の違いを示す。ポート内に噴射された燃料は筒内に吸入された後、筒内のタンブル流れによって点火プラグ近傍に輸送されるため、燃料の噴射時期が380°の場合は、噴射時期が早すぎるため濃い混合気が点火プラグ部を通過した後に点火が行われ、最も燃焼変動の少ない噴射時期415°の場合には、点火プラグ近傍に濃い混合気が集まっていることなどが分かった。

4. 2. 燃料噴霧挙動測定

ショートスリーブタイプのエンジンを用いた筒内燃料噴霧の測定例⁸⁾を紹介する。測定には4Wのアルゴンイオ

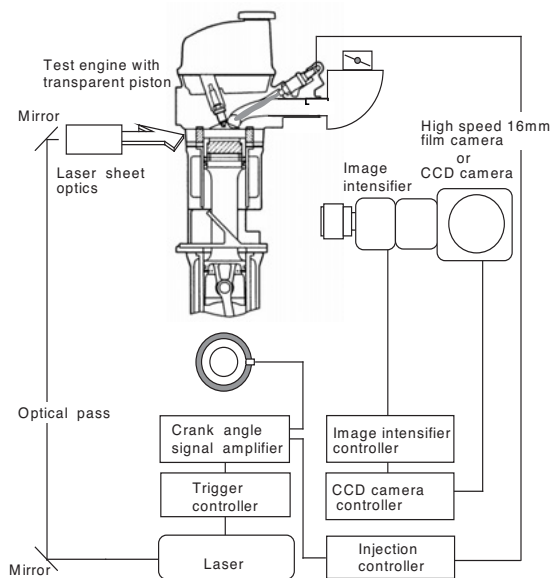


Fig.14 Schematic of instrumentation

ンレーザーを光源として用い、これを3mmの厚さのシートにしてショートスリーブを通して入射させ、シート面を通過する燃料噴霧からの散乱光を、ピストンウィンドウを通して16mm高速度カメラで撮影した。Fig.17に、二本の吸気バルブの内一本のバルブを休止した場合(VTEC mode)と二本の吸気バルブを共に作動させた場合(4-VALVE mode)の燃料噴霧挙動の違いを示す。この図よりVTEC modeの燃料噴霧は、4-VALVE modeに比べ燃焼室中央部に集まり、周辺部への分散が少ないことなどが分かった。

4. 3. 三次元空気速度測定

最後にロングスリーブタイプのエンジンを用いた筒内三次元空気速度の測定例⁷⁾を紹介する。測定にはPCPV (Particle Coded Pulse Velocity)法を用い、筒内全域の空気速度を測定するため、レーザーシートをFig.3のBの位置より、ロングスリーブを通してそれぞれ高さの異なる測定断面に入射させた。吸入空気に混入させた粒子が、レーザーシート面通過時に発生する散乱光を、Fig.3のカメラ位置Cの高解像度CCDカメラにより撮影した。

Fig.18はVTEC modeでの筒内流れの代表例であり、矢印によりスワールの方向と速度を表わし、ドットパターンの濃淡によりシリンダ軸方向の速度を示し筒内の三次元流れを示している。吸入行程の中程(クランク角450°)では、二つの吸気バルブの間より排気バルブ側へ強い下向き(ピストン方向へ)の流れがあり、これに対しシリンダ壁左右に二分された上向きの流れがある。この時期にはスワール流れは形成されておらず、空気の流入の仕方は斜めスワールといった流れとは大きく異なっている。ピストンの動きがほぼ停止する下死点付近(クランク角

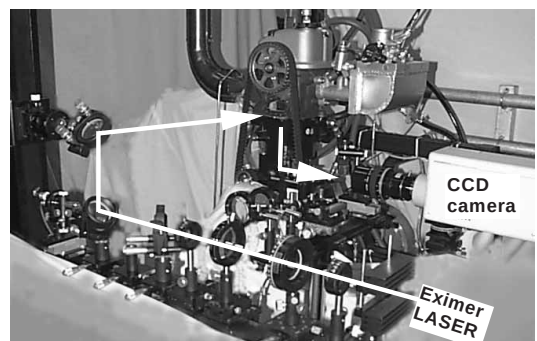


Fig.15 Schematic of instrumentation for LIF

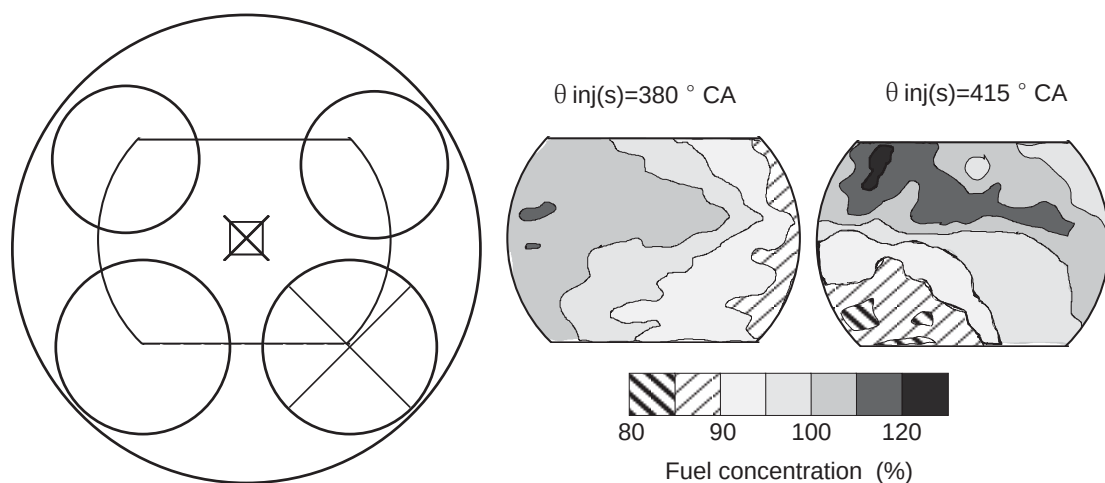


Fig.16 Influence of $\theta_{inj}(s)$ on fuel concentration

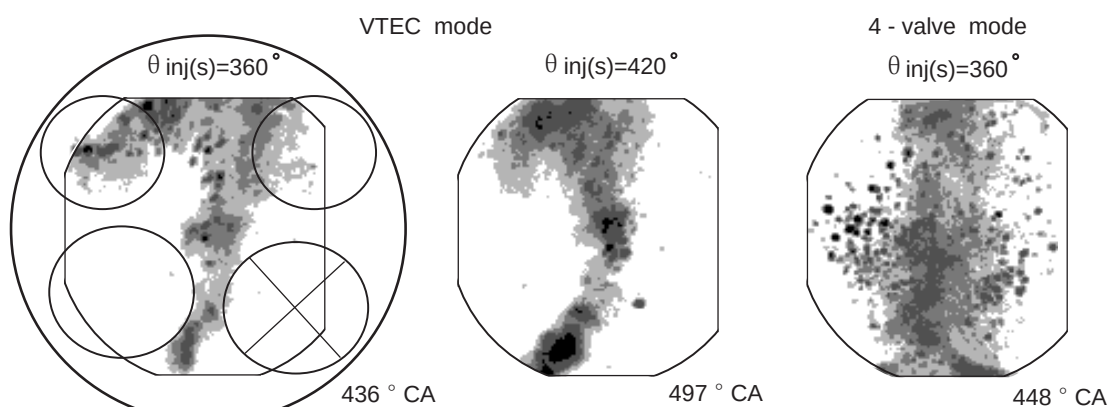


Fig.17 Influence of $\theta_{inj}(s)$ on spray for VTEC mode and 4-valve mode operation

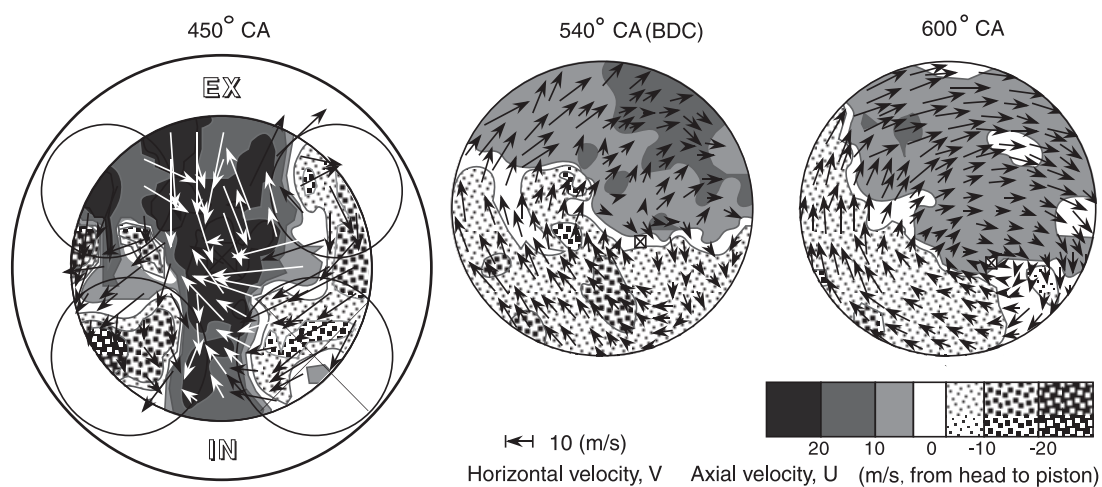


Fig.18 Contours of instantaneous 3D air velocity by PCPV with full throttle in motoring operation

540 ㊦になると、強い軸方向の流れはスワール、タンブル方向の安定した流れに推移していくことなどが分かった。

5. まとめ

筒内現象の測定要求より開発した筒内全域の可視化が可能なエンジンの構造と特有な技術および各可視化エンジンを使用した筒内の現象解析例を紹介した。ここで示した解析例により、可視化エンジンを用いた解析法の有効性が示せたものと考ええる。今後も可視化エンジンの改良を進めると共に、引き続き筒内現象の解析を行っている。

参考文献

- 1) P. Wolanski et al., 「Study of Combustion Dynamics in the Research Engine」 SAE972829, 1997
- 2) E. Rouland et al., 「Particle Image Velocimetry Measurements in a High Tumble Engine for In-Cylinder Flow Structure Analysis」 SAE972831, 1997
- 3) M. Wensing et al., 「Characteristics and Application of Gasoline Injectors to SI Engines by Means of Measured Liquid Fuel Distributions」 SAE972947, 1997
- 4) T. Fujikawa et al., 「Quantitative 2-D Fuel Distribution Measurements in an SI Engine Using Laser-Induced Fluorescence with Suitable Combination of Fluorescence Tracer and Excitation Wavelength」 SAE972944, 1997
- 5) S. Pischinger et al., 「How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine」 SAE900021, 1990
- 6) A. Nakamura et al., 「Application of Image Converter Camera to Measure Flame Propagation in S.I. Engine」 SAE890322, 1989
- 7) 石井清ほか, 「レーザシート法によるシリンダ内流れの三次元測定」機学論63巻、605号、B編、pp.350-355, 1997
- 8) 石井清ほか, 「VTEC-Eエンジンにおける燃料噴霧の挙動」ホンダR&DテクニカルレビューVol.9, pp.90-99, 1997
- 9) M. Berckmuller et al., 「In-Cylinder Crank Angle Resolved Imaging of Fuel Concentration in a Firing Spark Ignition Engine Using Planar LIFS」 The Combustion Institute, 25th Symposium on Combustion, pp.151-156, 1994
- 10) 石井清ほか, 「点火プラグ部の熱流束の測定」機学論64巻、618号、B編、pp.303-307, 1998
- 11) K. Ishii et al., 「Investigation of Cyclic Variation of IMEP Under Lean Burn Operation in Spark-Ignition Engine」 SAE972830, 1997

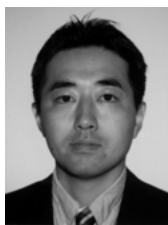
■著 者■



佐々木 隆



吉田 一夫



浦田 泰弘



大野 敏久



石井 清