

イメージコンバータカメラを用いた火花点火機関の 燃焼可視化装置 ～その2～

Application of an Image Converter Camera to Measurement
of Flame Propagation in a Spark Ignition Engine -Part 2-

中 村 昭 壽* 石 井 清**
Akihisa Nakamura Kiyoshi Ishii
佐々木 隆**
Takashi Sasaki

要 旨

量産 S.I. エンジンの開発段階において、燃焼室形状の評価が可能な、燃焼診断装置としての新しい可視化システムを開発した。このシステムは主にイメージコンバータカメラとパーソナルコンピュータ制御のイメージプロセッサからなり、 1000cd/m^2 の低光量において 10000 コマ/秒の高速撮影と、リアルタイムでの火炎画像の再生を可能とした。

このシステムを用いて、火炎画像の輝度分布より推定される量産 4 バルブエンジンの火炎構造と火炎伝播を測定した。その結果、4 バルブとスワールを強くした擬似 2 バルブの燃焼室形状では、同一な指圧線図を持つ場合でも火炎構造と伝播の違いがあることがわかった。

ABSTRACT

A combustion flame visualization system was developed in order to evaluate combustion chamber shapes in the development stage of mass-produced spark ignition (S.I.) engines. The system consists of an image converter camera and a computer-aided image processing system. The system is capable of high speed photography (10,000fps) at low intensity light ($1,000\text{cd/m}^2$), and of real-time display of the raw images of combustion flames.

By using this system, the flame structure and flame propagation direction, estimated from the brightness level on a photograph, were measured in a mass-produced 4-valve engine. In comparison with the measurement in quasi-2-valve combustion chamber specially used to intensify swirl, difference was apparent in the structure and propagation of the flame. That difference cannot otherwise be identified, especially in an analysis using pressure diagram alone.

1. ま え が き

近年、乗用車用ガソリンエンジンの高性能化が進むにつれ、高性能と高品位の両立が益々重要な研究課題となってきた。高性能エンジンでのスムーズなクルージング走行と静粛なアイドリングを得るため、低負荷運転時の燃焼安定性改善を高性能燃焼室形状や機関諸元を維持したまま、限られた狭い範囲の形状変更で行なわざるをえないのが現状である。

従来、低負荷燃焼時の燃焼安定性の解析は、主として指圧波形の解析により行われており、多く

の研究が報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。又他の手法として、高速度カメラなどの燃焼撮影により燃焼火炎伝播を明かにしようとする研究成果も報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかしながら、火炎の可視化技術は、フィルムの感度や可視化用エンジンの製作といった幾つかの困難さを伴っている。

ガソリンエンジンの分野では、特に部分負荷運転時における低光量なブルーフレームを撮影する事は難しく、火炎染料としての化学薬品を燃料に添加するなどして対処している⁽⁵⁾。他の大きな問題として、高速度カメラによる撮影は、その高

* 国際交通安全学会

** 和光研究所

感度フィルムの現像処理に時間を要する事である。従って、このようにして得られた火炎画像では、指圧線図の解析から得られた情報と組合わせて、リアルタイムで燃焼現象を判断できる現場向けのツールとは、成り得なかった。

近年、高速度電子カメラやTVカメラを用いた撮影手法が提案され⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾、画像の情報処理が極めて短時間に行なわれるようになり、この種の撮影法が燃焼診断の有力なツールとなってきた。しかしながら、部分負荷運転の燃焼火炎であるブルーフレームの直視撮影を行ない、その燃焼特性に的を絞った研究の発表は、まだ少ない⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。

この論文では、ブルーフレームの撮影と撮影画像の即時処理が可能な燃焼室形状開発のツールとしての燃焼可視化システムについて述べ、次いでこの装置を用いて撮影された量産4バルブエンジンの部分負荷運転時の火炎形状について、擬似2バルブ燃焼室のものと比較しながら述べる。さらに、この比較研究より得られた“ガイドライン”に沿って、量産4バルブエンジンの燃焼室形状の改良を行ない、このシステムが有効である事を示す。

2. システムの構成

2.1 撮影システムに要求される項目

本システムの開発の狙いは、量産ガソリンエンジンの開発過程において、燃焼火炎挙動をほぼリアルタイムで測定し燃焼診断を行なえる様にする事にある。それゆえシステムに求められた条件は、

- (A) 輝度レベル 1000cd/m^2 程度の予混合燃焼のブルーフレームの撮影が可能な事。
 - (B) クランク角 1° 毎の撮影速度 (1万コマ/秒)
 - (C) 画像処理がその場で即座に可能な事
- 等であった。

2.2 カメラに要求される感度と撮影速度

ブルーフレームの撮影に必要な感度は、二つの石英窓を持つ容積は80ccの定容燃焼器内でプロパンを燃焼させて求めた。プロパンガスの濃度は $A/F \approx 16$ のリーン燃焼時の火炎の色に近くなるように、空気量を調節して用いた。予混合プロパ

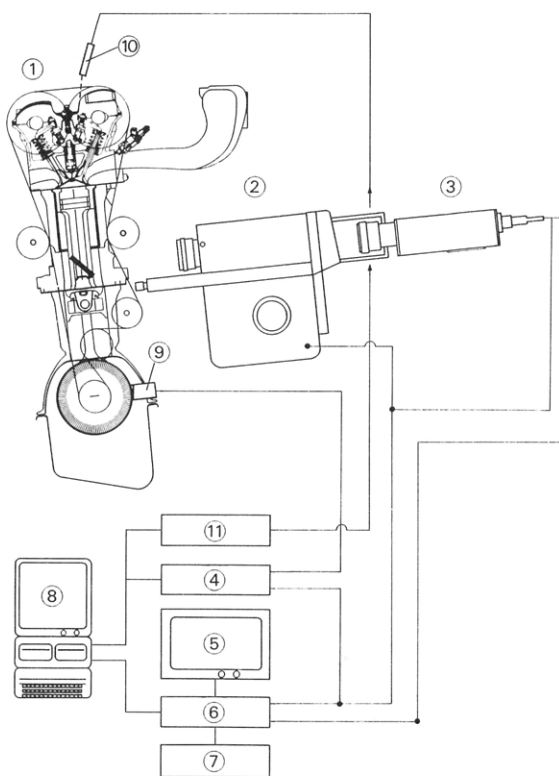
ン燃焼の光量は、ハイスピードフォトダイオードを用いて計測し、撮影対象火炎の輝度レベル (1108cd/m^2) を算出した。

撮影速度はエンジン回転数 1500rpm においてクランクアングルで 1° 毎とするために、撮影速度 10000 コマ/秒とした。

2.3 撮影システムの構成

システムの構成を図1に示す。

(A), (B)の項目を満足する撮影装置として



- ① Test engine with transparent pistons
- ② Image converter camera
- ③ S.I.T. camera
- ④ Frame blanking generator
- ⑤ TV color monitor
- ⑥ Computer graphic control unit
- ⑦ Optical memory disk
- ⑧ 16 bit personal computer
- ⑨ 360 pulses crank angle pick-up
- ⑩ Piezoelectric transducer (Kistler 7061)
- ⑪ Charge amplifier

図1 システムの構成

フレーミング式イメージコンバーターカメラ② (英国 Hadland Photonics 社製 IMACON 790) を採用した。このカメラについては後述する。

(C) の項目に対しては、SIT カメラ③ (Silicon Intensifier Target、浜松ホトニクス 社製 C1145-2) を IMACON 790 に接続して用いた。

これにより、IMACON 790 の蛍光スクリーン上に静止された 8 駒の画像を光電変換し、撮影後直ちに画像処理装置へ送る事が可能となった。

解析装置は、各カメラの同期制御部④、NEXUS 6410 を中心とする画像処理部⑥、光りディスクメモリー (1.2Gb 柏木研究所) を用いたメモリー部⑦ 及びシステム全体を制御するパーソナルコンピュータ⑧ (NEC PC-9801Vm) で構成されている。

2.4 イメージコンバーターカメラ

燃焼火炎を画像化するカメラとして、前述したようにフレーミング型イメージコンバーターカメラ “IMACON 790” を選定した。このカメラのフォトカソードタイプは S20UV で、分光感度特性は 200~800nm にあり、燃焼のブルーフレームの発光波長 390~510nm を高感度でカバーできる。カメラの蛍光スクリーンには、460nm にピーク波長を持つアルミナイズド P11 を使用し、有効径 80mm の面に 1 コマ 18mm×16mm の画像を 4 列 2 段に 8 コマのフォトンイメージを表示する。蛍光スクリーンには、素線径 5.5 μ m の光ファイバーが直接継がれ、10 本/mm の解像度で SIT カメラに少ない光量ロスで蛍光像の伝達を可能にしている。この解像度は、燃焼火炎面において 1mm 弱に相当する。

3. テストエンジンの主要諸元と運転条件

3.1 エンジン主要諸元

この研究に使用されたベースエンジン①は、直列 4 気筒 1.6 ℓ 、DOHC 4バルブ量産エンジンであり、その主要諸元を表 1 に、燃焼室形状とミックスチャフローを図 2 に示す。量産エンジンと同じ燃焼室形状での燃焼火炎の撮影の為、透視型ピストンを用いて No.1 もしくは No.4 シリンダーのピストン下方から燃焼火炎を撮影出来る様にした。

ピストンに組み込まれた観測窓径は、ボア径 75mm に対して、54mm であり、燃焼室中央より拡がる

表 1 テストエンジンの主要諸元

Displacement	1590cc
Number of Cylinders	4
Bore	75mm
Stroke	90mm
Compression Ratio	9.3
Valve Dia. Inlet	30mm×2
Exhaust	27mm×2
Valve lift Inlet	10.3mm
Exhaust	9.0mm
Fuel Supply	Sequential Fuel Injection
Quartz Window Dia.	54mm(effective)

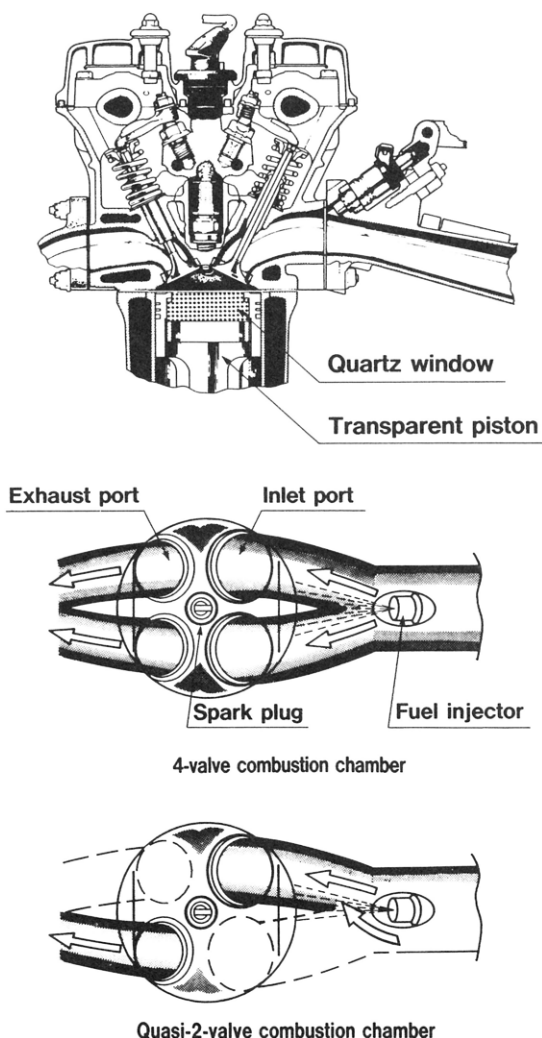


図 2 燃焼室形状とミックスチャフロー

初期火炎の成長の観測には十分な大きさとする事ができた。

シリンダーヘッドは量産品に圧力センサー⑩取り付け用ネジ加工を施ただけで使用した。

3.2 運転条件

テストエンジンの運転条件とスワールレシオ (SR) を表 2 に示す。燃焼安定性の異なる燃焼室での火炎画像の違いを得る為に Case-1 と Case-2 の 2 種類の燃焼室形状が用意された。Case-1 は、量産 4 バルブエンジンそのままで、スワールレシオは $SR=1.2$ である。Case-2 では、これと同一のシリンダーヘッドを用いて、吸、排気バルブ、各一個を交叉状に停止し、より強い $SR=2.3$ を得る擬似 2 バルブ燃焼室が用意された。スワールレシオはインパルススワールメーターを用いて、気体の流れにより生じるねじれトルクから計算し求めた⁽¹²⁾。

さらに、燃焼室形状の改良を計るために Case-3, 4, 5 の燃焼室形状がテストされた。これらを図 3 に示す。

運転条件は 40km/hr クルーズ走行の負荷に近い、エンジン回転 (1500rpm) と体積効率 ($\eta_v=29\%$) に設定した。

4. テスト結果と考察

4.1 量産エンジンにおける燃焼診断

安定した燃焼を持続できるような燃焼条件を得る為には、燃焼変動の要因解析が必要である。燃焼の変動についての解析例としては、“着火直後のプラグ廻りに生成された火炎が既に変動の影響を受けている”事が示されており⁽¹³⁾、本来この部分的に的を絞った基礎的研究が必要である。しかしながら、量産エンジンの開発段階において燃焼

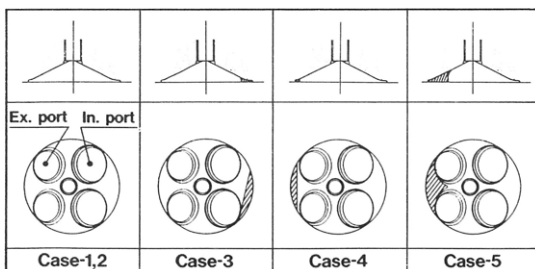


図 3 燃焼室形状

表 2 運転条件とスワールレシオ

	Case-1	Case-2	Case-5
No. of Inlet Valves	2	1	2
Exhaust Valves	2	1	2
Engine Speed	1500rpm	←	←
Volumetric Efficiency	29%	←	←
Equivalence Ratio	1.0	←	←
Ignition Timing (MBT)	32°BTDC	28°BTDC	30°BTDC
Swirl Ratio	1.2	2.3	1.2

室形状の良、否を判断するような“簡単な燃焼診断手法”としては、その形状にさらに改良の余地が残されているかどうか判断できれば充分と考えられる。ここでは、これを目的として火炎画像より直接的に得られる情報で、燃焼室形状のリファインが可能であった事を示す。

初めに、簡易燃焼診断の目安として、何が火炎画像から得られるかを検討する為に、比較的良好な燃焼安定性を持つ Case-2 の擬似 2 バルブ燃焼室を量産 4 バルブ燃焼室と比較した。Case-2 燃焼室では、プラグが燃焼室の中心に位置し、かつ吸入ポートと排気ポートが燃焼室中心に対し偏って配置されている為にスワール流が生成され短い燃焼時間 (ファーストバーン) が達成でき、良好な燃焼安定性が得られる。

目安を得る手順として

- ・火炎境界の定義
- ・4 バルブ、擬似 2 バルブ燃焼室における火炎画像
- ・4 バルブ、擬似 2 バルブ燃焼室における代表的な画像

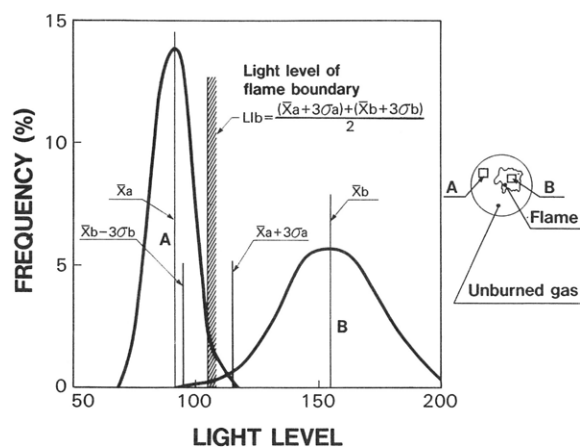


図 4 火炎の境界

- ・輝度分布から推定された火炎形状
- ・火炎伝播方向

について述べ、次いでその具体例としての、Case-5の燃焼室について述べる。

4.2 火炎境界の定義

部分負荷運転に於けるガソリンエンジンの火炎は、通常ブルーフレイムであり、しかも輝度が小さく直視観察が難しいとされている。

この様な低光量下で撮影された燃焼初期の画像は、フレイムフロントと未燃焼部である背景の輝度差が小さく目視で明確に区別する事が難しい。火炎の境界を決定する為に、火炎画像を2値化する手法として、一般に行われている微分による方法を試みたが、火炎成長の初期のような輝度が低い場合には、分離が難しくこのシステムへの適用は出来なかった。このシステムでは撮影された火炎画像の中の領域A(バックグランド部)と領域B(フレイム部)の画素の相対輝度を図4のよう

に統計処理した。A, B 領域共に相対輝度値は正規分布を示し、各々の中心輝度値($\bar{X}_a$, $\bar{X}_b$)からそれぞれ $3\sigma_a$, $3\sigma_b$ 離れた点、 $\bar{X}_a + 3\sigma_a$ と $\bar{X}_b - 3\sigma_b$ の中間点を火炎の境界とすると、視覚に依るものとよく一致することがわかり、ここでは、この値を火炎の境界値(L1b)と定義することにした。

4.3 4バルブ、擬似2バルブ燃焼室における火炎画像

この装置により、燃焼室形状の違いが火炎画像としてどのように違うか比較する為に、Case-1, 2 燃焼室をもちいて、火炎を撮影した。

図5に、Case-1 燃焼室での、ある独立したサイクルの一連の画面を示した。図6は、図5と同一条件において撮影された多くの画像の中からクランク角(CA) = -7.3° 位置のものを抜き出し並べたものである。ここでいうCAはATDCで示す。これらの画像より Case-1 における火炎構造と伝播につ

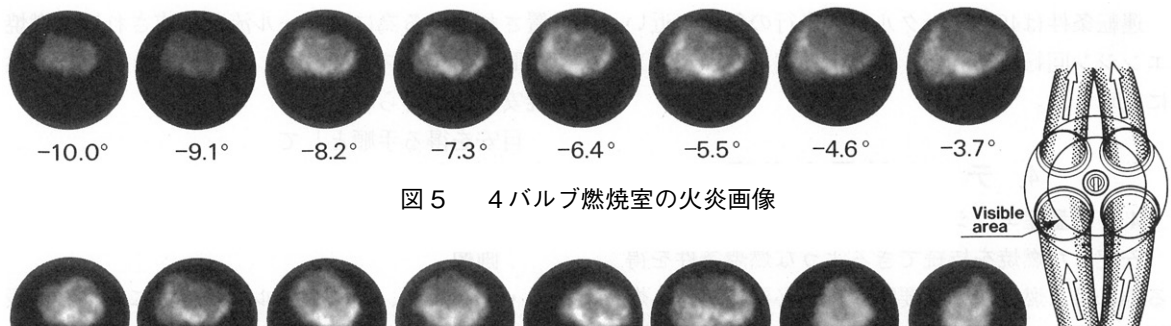


図5 4バルブ燃焼室の火炎画像

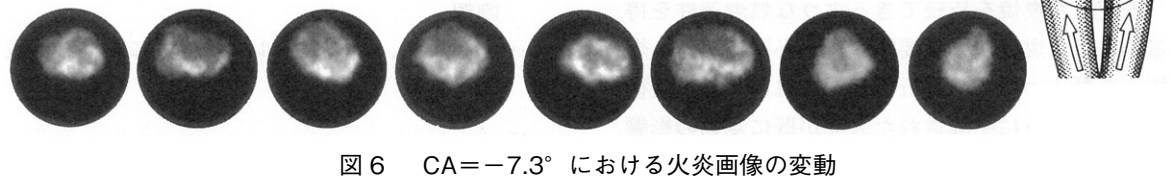


図6 CA = -7.3° における火炎画像の変動

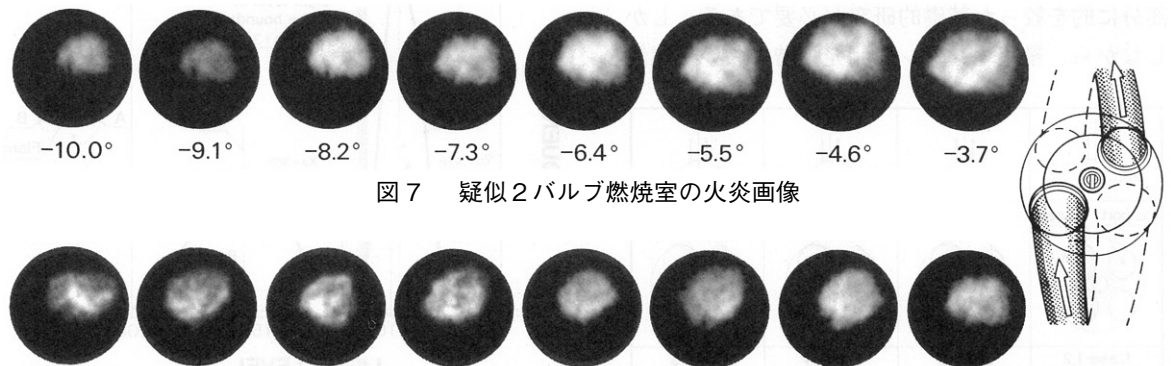


図7 擬似2バルブ燃焼室の火炎画像

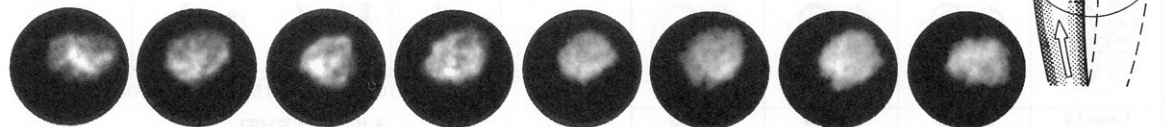


図8 CA = -7.3° における火炎画像の変動

いて共通する事柄は、

- 火炎の輪郭に近い部分が明るく、中央部が暗い、
 - 初期火炎伝播は、図で左上方にかたよる、
- などである。

同様に Case-2 燃焼室についての画像を、図 7、8 に示した。これらの画像より共通する事柄は、

- 火炎全体が一様に明るい、
 - 初期火炎伝播は、Case-1 に比べ円形に近い、
- などである。図 6、8 で示した画像の指圧線図を各々図 9、に示した。さらに Case-1、2 において 350 サイクルの指圧線図より求めた図示平均有効圧 (IMEP) の分布を、図 10 に示す。これらより、前

述した Case-1、2 での画像の特徴は、サイクル変動を伴っている時に存在している事が確認できる。

4.4 4バルブ、擬似2バルブ燃焼室における代表的な画像

(代表的なサイクルの選び方)

Case-1、2 の火炎画像を、グラフ化して比較する為に各仕様における代表的なサイクルを選びだす必要がある。ここでは、次に示す方法でこれを決めた。

- (1) 図 10 において、Case-1 の IMEP の平均値を求め、この値に近い指圧線図を持つサイクルを Case-1 の代表サイクルとする。
- (2) 同様に、Case-2 の IMEP の平均値を求め、ほ

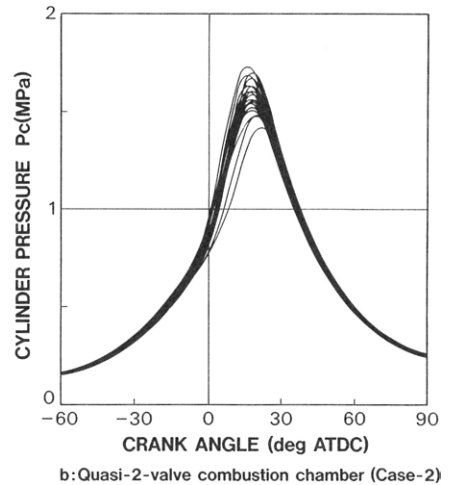
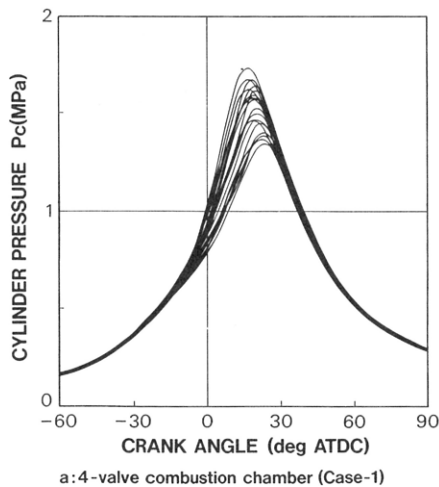


図 9 Case-1、2 燃焼室における指示線図

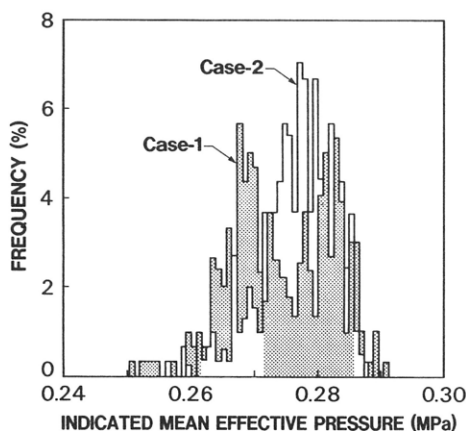


図 10 IMEP の頻度分布

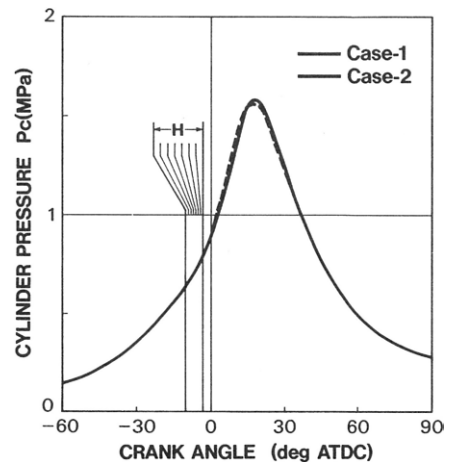


図 11 代表的なサイクルの指示線図

ば Case-1 のそれと等しい事を確認した上で、Case-1 の代表サイクルとはほぼ同じ指圧線図を持つサイクルを選びだす。これを Case-2 の代表サイクルとする。

このように選びだした代表的な指圧線図を図 11 に示す。2つの線図は、多少の差異は有るものの図 9 に示したサイクル変動に比べれば、ほぼ同一と見る事ができる。

図 5, 7 に示した連続した 8 コマの画像は、このようにして選びだされた代表的なサイクルのものである。

(比較画像の選び方)

図 6, 8 は、CA = -7.3° 位置での画像を抜き

出し並べたものである。この位置は、

- (1) 燃焼の初期の画像である事、
- (2) 画像の大きさがサイクルの特徴を示すに充分である事、

などの条件を元に次に示す様に決めた。画像の火炎断面積 (Af) と最大筒内圧力 (Pmax) の関係を図 12 に示した。CA = -15° では、Pmax で 0.3 MPa の増加に対して火炎面積が 2% 増加している。CA = -7.3° になると同じ Pmax の増加に対して Af は、20% 増加する。この様子を示したのが図 13 であり CA = -7.3° 以降は、傾きが一定になる事が判る。又、質量燃焼割合 (Z) の関係を図 14 に示し、CA = -7.3° の Z は、1.7% である事が判る。これらに

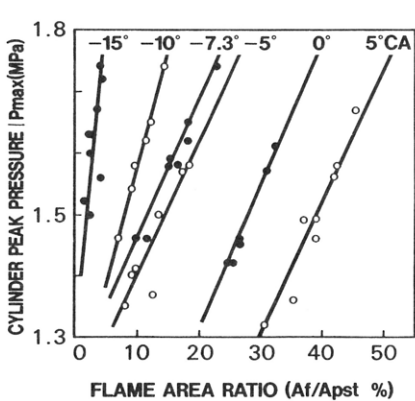


図 12 火炎断面積と筒内最大圧力

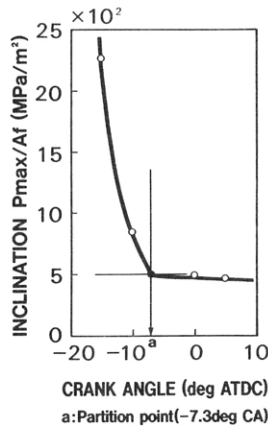


図 13 Pmax/Af の傾き

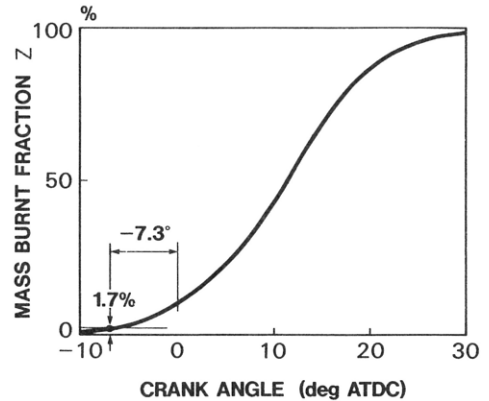
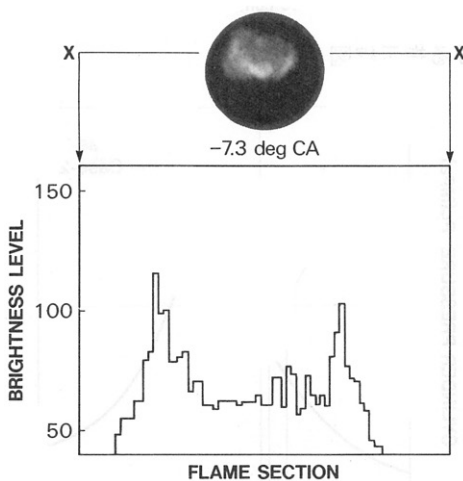
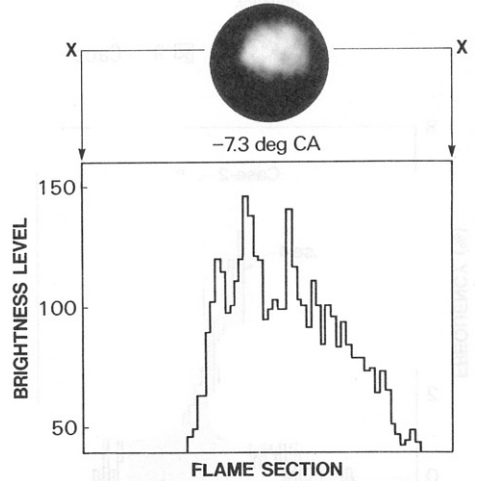


図 14 質量燃焼割合



a: 4-valve combustion chamber (Case-1)

a : 4 バルブ燃焼室



b: Quasi-2-valve combustion chamber (Case-2)

b : 疑似 2 バルブ燃焼室

図 15 火炎断面の輝度分布

より、上記2条件を満足する比較位置として、図13のa点($CA=-7.3^\circ$)とした。火炎画像の断面の輝度分布と輪郭は、この位置の画像を用いることとした。

4.5 輝度分布から推定された火炎形状

前述した方法で抜き出されたCase-1, 2の代表サイクルの画像のエンジクランク軸方向の断面の輝度分布を図15に示す。Case-1では、火炎画像の中心付近が暗く、輪郭部が明るくなっていることがよく判る。Case-2では、火炎画像の中央部が明るくなっている。より安定した燃焼を示すCase-2では、ほぼ同心指圧特性でも火炎の中央部が明るく、球状の火炎構造を想像させている。これに対して、安定度の劣るCase-1では、火炎の核が分裂し、薄く広がっている事を想像させる。

ここで簡易燃焼診断の目安の一つとして、火炎の中心部付近の輝度が高く、“火炎が球状にまとまっている事”が必要と推測できる。

4.6 火炎伝播方向

ほぼ同じ指圧線図を持つ、Case-1, 2の燃焼室に

おける火炎の伝播過程を図16に示す。Case-1, 2の火炎は、概ね初めにExバルブ方向へ成長し、次いで吸気バルブ方向へ成長していく事が判る。さらに細かくみると、Case-1の火炎は、図の左上方向に進むが右上方向への火炎伝播は遅れが目立ち、吸、排気バルブ方向への成長差が大きい。Case-2の火炎は、スワール流により図の右上方向への伝播が促進され、Case-1での遅れを改善した。又、吸、排気バルブ方向への成長差が比較的小さくなったことがわかる。しかしながら、Case-1, 2ともに初期火炎の成長は、燃焼室の中央のプラグ位置から離れている。

ここでは簡易燃焼診断の目安の二つ目として、“火炎の成長方向に著しい偏りがある事は、燃焼の安定を妨げている”という事が推測された。

4.7 簡易燃焼診断の目安

Case-1, 2の代表的なサイクルから判った二つの目安は、

- 火炎の中心部付近の輝度が高く、火炎が球状にまとまっている事、
- 火炎の成長方向に著しい偏りがある事は、燃

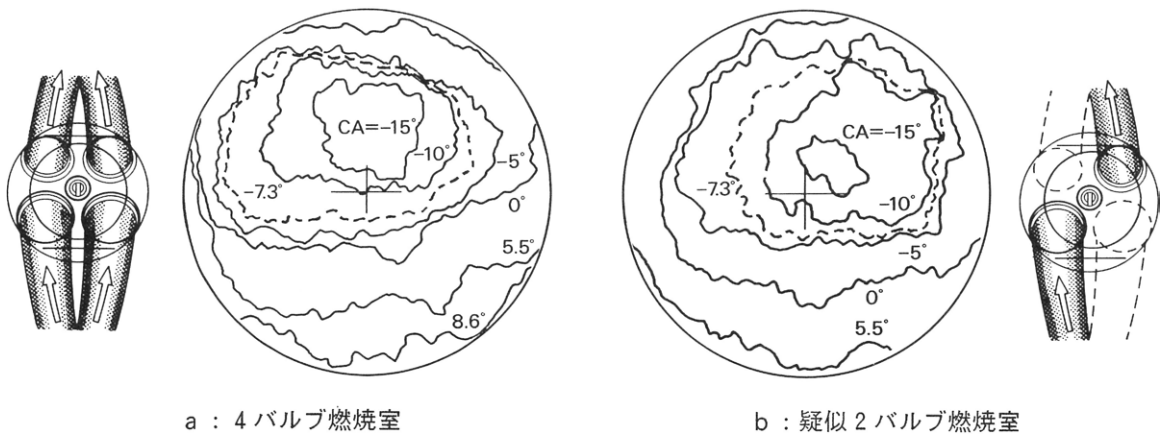


図16 火炎伝播図

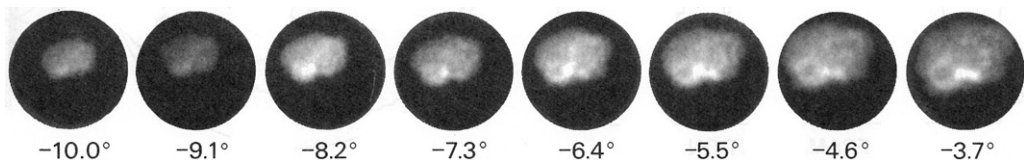


図17 スキッシュ4バルブ燃焼室における火炎画像

表 3 各燃焼室形状と IMEP, Cpv

Combustion chamber	IMEP (MPa)		Cpv (%) * Coefficient of IMEP variation
	Average of 350 cycles	Typical cycle	
Case-1	0.275	0.275	3.3
Case-2	0.278	0.272	2.5
Case-5	0.281	0.274	1.7

焼の安定を妨げる、

であった。これらは、前述した Case-1, 2 の多数のサイクルの画像を目視して判った事と一致する事が確認できる。よって、図 11 に示した二つの代表サイクルは、Case-1, 2 の多くの燃焼サイクルを代表したものとして見做してよいことが確認できる。

さらに言い換えると、同一な指圧線図を有する様な燃焼でも、火炎の構造と伝播方向に明らかな違いが有る事が確認された。

4.8 スキッシュ付き燃焼室による燃焼の安定化

簡易燃焼診断の目安を元に 4 バルブ作動 (Case-1) のままで燃焼を安定化させる事が出来るかを検討するために Case-3, 4, 5 の燃焼室を用意した。これらを図 3 に示した。Case-3 は、火炎伝播方向が Case-2 と同じように、初期火炎が画像上で右上になるように試みたものであり、Case-4 は、火炎が排気バルブ側に偏っているのを、より中心側に寄るように試みたものであった。Case-5 は、Case-4 をさらに強くしたものである。燃焼の安定化に対して Case-3, 4 は、効果が無く、ここでは効果があつた Case-5 の結果について述べる。

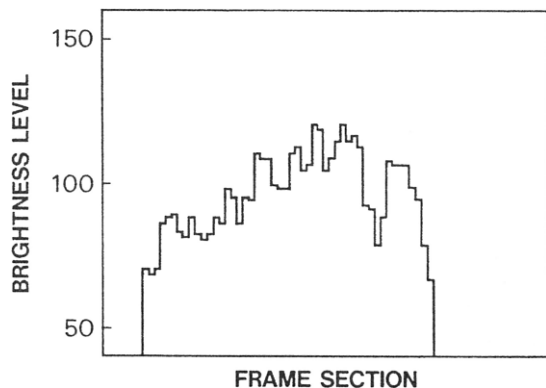


図 18 Case-5 燃焼室における火炎断面輝度分布

前述した方法で Case-5 の代表的な燃焼サイクルを選びだし、その一連の火炎の画像と輝度分布及び火炎伝播を図 17, 18, 19 に示す。第一に気が付くのは、初期火炎の成長が、Case-1, 2 の場合には着火点 (プラグ位置) より離れた所より始まっているのに対して、Case-5 ではプラグ位置より拡がり始めている事である。これは図で上側から下側へのスキッシュ流れによる効果であり、初期火炎伝播の中心が最もプラグ位置により、各方向への火炎伝播速度が均一なものとなった。火炎画像の輝度は Case-2 のもののほど大きくは無いが、輝度部は分散される事無く、火炎がまとまっている様に見え、良好な結果を示している。

火炎画像の輝度分布をカラー表示し、Case-1, 2, 5 について比較したものを図 20 に示す。輝度の最も高い部分を白色、低い部分を青色として、図の右側にカラーバーとして示した。

これらの結果は、簡易燃焼診断の二つの目安を満足した事を示す。

Case-5 の燃焼室における 350 サイクルの IMEP の分布を図 21 に示す。また、Case-1, 2, 5 の燃焼室における IMEP 変動率の比較を表 3 に示す。図 21 及び表 3 は、Case-5 燃焼室が他のものより燃焼の安定性に優れている事を示している。Case-5 燃焼室の IMEP 変動率 (Cpv) が Case-2 燃焼室よりも良くなっているのは、 $CA = -15^\circ$ における質量燃焼割合で 1% 未満の成長初期段階の火炎を着火点から離れない様にし、点火エネルギーを無駄なく使い、より強固な火炎核を形成できた為と考えられる。この結果、着火遅れ時間の変動が最少となり IMEP 変

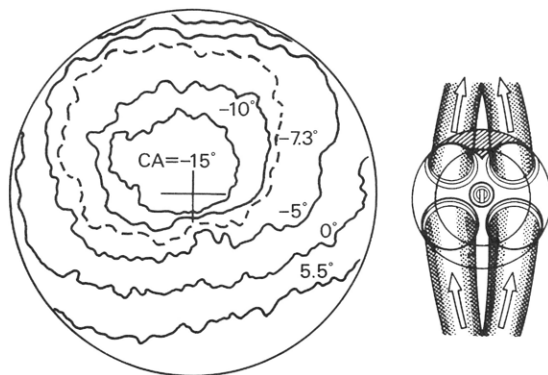


図 19 Case-5 燃焼室の火炎伝播図

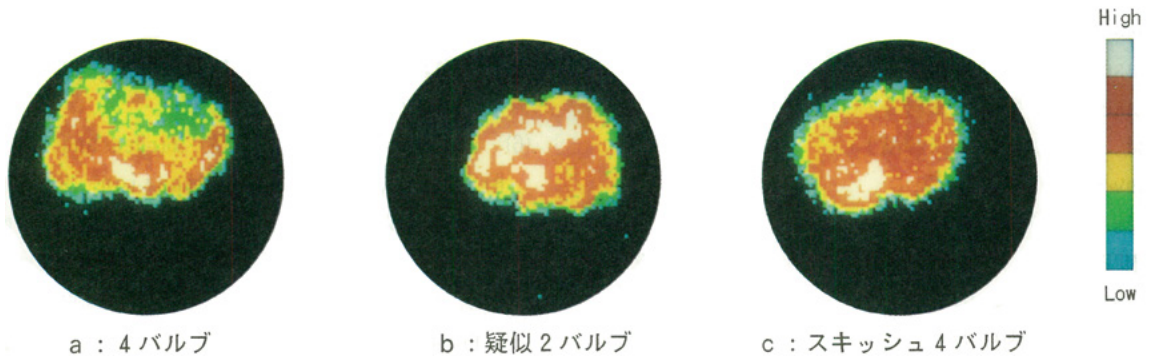


図 20 燃焼室形状による火炎の輝度分布 (CA=-7.3°)

動率を低下させ、IMEP を微増させたと考える。

さらに、Case-5 の結果より簡易燃焼診断三つ目の目安として、

- 点火点 (プラグ位置) を中心として各方向へ均一に火炎伝播する事、

が挙げられる。

このように、Case-1, 2 の結果を元にして推定した簡易燃焼診断の目安によって、少ない設計変更で、よりよい燃焼の安定性を得る事ができた。

“簡易燃焼診断の目安”が燃焼の安定性に対してどのような意味を持ち、作用しているか明確にできてはいない。しかし火炎の構造とその伝播方向を観察しつつ燃焼室形状を改良していく事が有効である事を示せた。

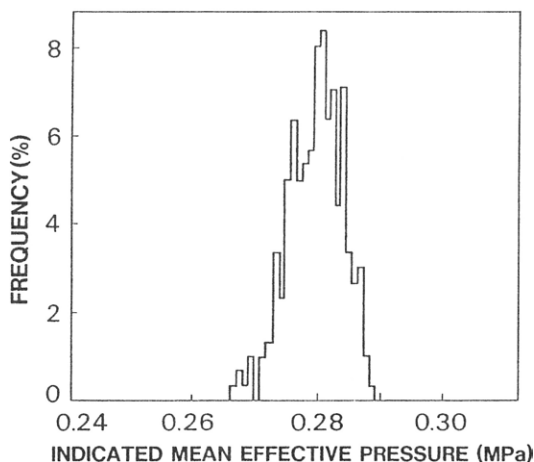


図 21 スキッシュ4バルブ燃焼室における IMEP 頻度分布

5. まとめ

この新しい可視化システムはエンジンテストベンチに設置され、量産開発段階の燃焼室形状の評価に効率的に使用されている。このシステムより得られた結果を以下に示す。

- (1) イメージコンバーターカメラとパーソナルコンピュータの組合せにより、1000cd/m²の微弱光であるブルーフレームを 10000 コマ/秒の高速で撮影でき、即時処理が可能な新しい撮影システムが開発された。

このシステムは量産ガソリンエンジンの開発段階に用いられ燃焼室の評価法として採用された。

- (2) 燃焼室形状によって燃焼安定性が異なる場合の火炎画像を多数比較する事によって、火炎画像からの“簡易燃焼診断”の三つのガイドラインを得た。
- (3) これらのガイドラインは、同じ指圧線図を示す様な燃焼特性の場合でも燃焼室形状に改良の余地が有るかどうか判断出来るものであった。

謝 辞

本論文の作成に当たり、御指導を頂いた東海大学浅沼強教授に深く感謝致します。

記号の説明

A/F	空燃比	
Af	画像の火炎断面面積	(m ²)
Apst	シリンダボア面積	(m ²)
CA	クランク角度	(deg)

Case-1	量産エンジンの4バルブ燃焼室	
Case-2	スキッシュ付2バルブ燃焼室	
Case-5	スキッシュ付4バルブ燃焼室	
cd	カンデラ(輝度)	
Cpv	IMEP 変動率	
fps	単位時間(s)のフレーム数	
IMEP	図示平均有効圧力	(MPa)
Llb	火炎の境界値	
Pc	筒内圧力	(MPa)
Pmax	最大筒内圧力	(MPa)
SR	スワール比	
$\bar{X}_a$	バックグランド部の中心輝度値	
$\bar{X}_b$	フレーム部の中心輝度値	
Z	質量燃焼割合	(%)
η_v	体積効率	(%)
σ_p	IMEP の標準偏差	(MPa)

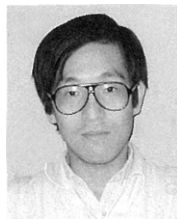
参 考 文 献

- (1) Frederic A. Matekunas, "Modes and Measures of Cyclic Combustion Variability". SAE Paper 780319
- (2) Nakai, M., Y. Nakagawa, K. Hamai and M. Sone. "Stabilized Combustion in a Spark Ignited Engine Through a Long Spark Duration". SAE Paper 850075
- (3) Binder, K., Maly, "Effects of Ignition and Turbulence on Flame Speed at High Pressures and Temperatures". The 5th Internal Combustion Engine Symposium, Japan. (1985-6)
- (4) 柳、浅沼 "副室付火花点火機関の燃焼特性" 第5回 内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1985-6-10, 11 東京)
- (5) 稲森、柳、浅沼 "副室付火花点火機関における燃焼過程の可視化" 流れの可視化、Vol 8、No. 30 PP 209-214
- (6) Steinberger, R. L., W. W. Marden and F. V. Bracco, A Pulsed-Illumination, Closed Circuit Television System for Real Time Viewing of Engine Combustion and Observed Cyclic Variations". SAE Paper 790093
- (7) Kozuka, K., A. Saito, M. Okuta and K. Kawamura, "Television System for Viewing Engine Combustion Process and the Image Analysis" SAE Paper 810753
- (8) Iwasita, Y. and A. Saito, "Observation of Knock Using a High Shutter TV Camera System". SAE Paper 831696
- (9) Cuttler, D. H. and N. S. Girgis, "Photography of Combustion During Knocking Cycles in Disc and Compact Chamber". SAE Paper 880195
- (10) 三和田、近藤、井口、"エンジン燃焼解析への画像処理技術の応用", 自動車技術会学術講演会前刷集 882089, 1988
- (11) Nakamura, A., A. Tanaka and K. Yuuki "Application of Image Converter Camera to Measurement of Flame Propagation in Spark Ignition Engine". 1988 IGALEO meeting
- (12) Tippelmann, G., "A New Method of Investigation of Swirl Ports". SAE Paper 770404
- (13) Keck, James C. and John B. Heywood, "Early Flame Development and Burning Rates in Spark Ignition Engines and Their Cycle Variability". SAE Paper 870164

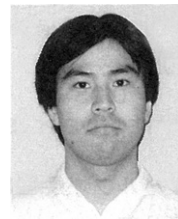
■ 著 者 ■



中 村 昭 壽



石 井 清



佐々木 隆