

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1～

Application of an Image Converter Camera to Measurement
of Flame Propagation in a Spark Ignition Engine –Part 1–

中 村 昭 壽* 田 中 敦**
Akihisa Nakamura Atsushi Tanaka
結 城 一 敏***
Kazutoshi Yuuki

要 旨

火花点火機関燃焼室中のフレイム形状を、イメージコンバータカメラと画像処理装置を使って、フレーミング速度1万コマ/秒で高速インスタント撮影する燃焼解析システムが開発された。このシステムは乗用車用4バルブエンジンに適用され、光ディスクに収録されたイメージメモリを使って、擬似カラー動画にする事により燃焼現象の把握に役立つ事が明かとなった。

ABSTRACT

A new combustion analysis system, comprised of an image converter camera and an image processing device, has been developed, in which the flame configuration inside the spark ignition engine combustion chamber can be photographed instantly and at a high speed of 10,000 fps. The system was applied to a mass-produced, 4-valve passenger car engine. And pseudo color motion pictures, which were reproduced from the image data stored on an optical disc, proved to be helpful in monitoring the combustion process.

1. ま え が き

高品質エンジン開発の為に重要な作業の一つである燃焼過程の解析は、従来主として指圧線図により間接的に把握されて来た⁽¹⁾⁽²⁾。

これに対し直接可視化された燃焼写真は確かに燃焼特性を明らかにする為の有益な手法であるが、フィルム感度やその処理及び可視化エンジンの製作と言った幾つかの困難を伴っている。

たとえばガソリンエンジンでは発光量の多い高負荷ノッキング時の高速度撮影の例が数多く報告されているが^{(3)～(7)}、理論空燃比又は希薄な燃焼時で光量が特に少ない部分負荷時の火炎伝播の撮影は、フレーミング速度を下げるか、又は燃料中に化学薬品を火炎染料として添加して光量増幅を図る方法⁽⁸⁾を採用するか、いずれかの方法を取らざるを得ない。しかし火炎染料を用いる方法では、撮影された火炎が元の火炎と同じであると言う保証は全くない。

燃焼撮影におけるもう一つの問題は高感度フィルムの現象の困難さに伴う撮影後の処理時間の制限である。このことは指圧線図解析装置と組み合わせるリアルタイムに燃焼診断を行なうというツールとしては大きな支障となっていた。

しかるに、近年高速度電子カメラやTVカメラを用いた観察手法が提案され情報のインスタント化が可能な事が報告され⁽⁹⁾、燃焼撮影が燃焼診断の有力な手法として見直されるようになった。しかし現在その撮影対象例はノッキング燃焼のように発光量の多いものや、低回転域に限られている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

山下らは、シングルフォトン領域の感度で、2次元同時検出可能なシンクロスキャンストリークカメラを用いたピコ秒時間分析発光スペクトル解析システムを開発し、生体系への応用を報告している⁽¹²⁾。この手法と高輝度撮影の中間に微弱光ブルーフレーム撮影の可能性が存在するものと考

* 国際交通安全学会

** 栃木研究所

*** 和光研究所

えた。そこで燃焼室設計開発の補助ツールとして、より高感度に火炎伝播を撮影する為に、電子フレーミングカメラと高感度 SIT (Silicon Intensifier Target) 撮像管カメラを組み合わせて、更にインスタント化を図る為デジタルイメージ技術を採用した新しい“低光量高速度撮影システム”を開発したので、そのシステムの概要と、それを使つての量産 4 バルブエンジンで行なつた火炎伝播の高速度撮影における画像処理について紹介する。

2. 低光量高速度撮影システムの構成

希薄予混合で運転されるエンジンのブルーフレームからの微弱放出光を、高速、高感度に検出するためのシステムは、

- 1) 高感度光検出部
- 2) 光-電気信号変換部
- 3) 画像処理・解析部
- 4) システム制御部
- 5) 補助機能としての記録部

から成り立つ。図 1 にシステムの構成図を示す。

2.1. 高感度光検出部

光検出部 (カメラ部) の要求性能を定量化するために、定容燃焼容器内でプロパン予混合ガスを点火燃焼させ、その時のブルーフレーム発光量をスポットメータで測定し、撮影対象火炎の輝度レベルを算出した。この結果、光検出部の具備すべき条件として、

- 1) 輝度レベル 1000cd/m^2 のブルーフレームが検知出来る事。
- 2) クランク角度 1 度相当 (約 55 マイクロ秒 / 3000rpm) の時間分解能を持つこと。

が明らかとなった。

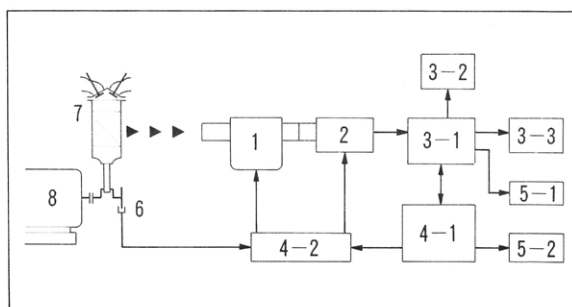
この要件に適合するカメラとして、露出時間をマイクロ秒オーダで制御出来るフレーミング型イメージコンバータカメラ (英国 HADLAND PHOTONICS 社製 イメコン 790) を選定した。このカメラのフォトカソードタイプは S20UV で、分光感度特性は $200\sim 800\text{nm}$ にあり、燃焼のブルーフレームの発光波長 $390\sim 510\text{nm}$ を高感度でカバー出来る。このカメラの蛍光スクリーンには、 460nm にピーク波長を持つアルミナイズド P11 を使用し、有効径 80

mm の面に 1 コマ $18\text{mm}\times 16\text{mm}$ 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 $5.5\mu\text{m}$ の光ファイバがダイレクトカップリングされ、10 本/mm の解像度で後述の SIT カメラに少ない光量ロスで蛍光像の伝達を可能としている。この解像度は燃焼火炎面の 1mm 弱に相当し、測定画像として使用するのに十分なものである。この蛍光画面に部分負荷運転時の燃焼像を 1 万コマ/秒で撮影し、ポラロイドカメラで直接撮影したものを図 2(a) に示す。また得られた像は火炎の範囲、形状を知るには十分であるが、火炎と背景を定量的に識別するのに必要な境界が光量的に明瞭に得られていないので、更に増感が必要な事が分かる。

フレーミング速度を 10 万コマ/秒に上げるには更に感度不足となるのでカメラの前にイメージインテンシファイヤ (II) を装着して入射光量の増幅を行なった。

この II はカメラとレンズカップリングした条件で 500 倍以上の増感能力があり、フォトカソードは S25 を使用し、分光感度特性もブルーフレームの波長域をカバーしている。蛍光スクリーンは直径 25mm で 15mm 径の像を 1 コマ表示する。

解像度は 20 本/mm で、イメコンと組み合わせた状態で同等の解像度が得られている。蛍光スクリー



- 1) Image Converter Camera
- 2) SIT Camera
- 3-1) Image Processor
- 3-2) CRT Monitor
- 3-3) Optical Disk
- 4-1) Host Computer
- 4-2) Frame Blanking Generator
- 5-1) Digital Video Copy
- 5-2) Printer
- 6) Crank Pulse Generator
- 7) Transparent Piston Engine
- 8) Dynamometer

図 1 システム構成図

ンには P47 が使用され、10% 残光時間は 0.1 マイクロ秒以下であり 10 万コマ/秒時のシャッター時間 2 マイクロ秒に対し十分なレスポンス特性を有するが、ダイナミックレンジが狭くなるので超高速撮影以外の使用は難しい。

2.2. 光-電気信号変換部

この変換部には SIT 撮像管を組み込んだ画像計測用 TV カメラを採用した。このカメラの分光感度特性は 400~800nm の可視光域をカバー出来、1mLx レベルからの光電変換特性を持つ。

図 2(b) は図 2(a) の画像を SIT カメラで光電変換後、画像処理装置を通した未処理イメージをデジタルビデオコピーしたものである。図 2(b) の段階で火炎と背景の輝度差は画像処理で分離出来るレベルが得られている。

2.3. 画像処理・解析部

画像処理・解析部は、イメージプロセッサ (NEXUS 6410)、表示画素数が 512×480 画素の CRT モニタ、及びメモリ容量 4500 フレームの光ディスクで構成されている。SIT カメラからの映像信号は CRT モニタへモノクロ画像表示され、エンジンテスト中にこのモニタされた画像を光ディスクへ格納するか再サンプルするかをテスト者は選択し、エンジン開発情報として最も有効な像を他の測定値と共に採集することが出来る。

2.4. システム制御部

システム制御部は、マイクロコンピュータ

(NEC、PC9801) とフレームブランキングジェネレータ (FBG) で構成される。マイクロコンピュータは、FBG の作動開始信号、光ディスク格納データのアドレス管理及びテスト条件の記録管理を行なう。これらのコントロールを対話型式で実行出来るソフト開発が行なわれた。FBG はイメコン 790 スクリーン上の短時間の発光像を効率良くサンプルする為に、SIT カメラの掃引開始を制御する。制御タイミングはテスト者の指定するクランク角度に合わせ、クランクパルスジェネレータからの上死点信号とクランク角 1 度当たり 1 パルスの信号を基にナノ秒オーダの精度でコントロールされる。

2.5. 画像記録部

CRT モニタ上の画像を記録するデジタルビデオコピーとプリンタで構成される。デジタルビデオコピーはボラロイドカメラと 35mm カメラの両方がセット出来るようになっている。

3. 高速度撮影された火炎伝播写真の画像処理

テストエンジンは量産 DOHC1.6ℓ 4 バルブエンジンである。燃焼画像は直列 4 気筒エンジンの第 1 気筒のピストン上部に装着したクォーツウインドを通し下方から撮影される。運転条件は約 25mph クルーズ走行負荷に相当する 1500 rpm、4PS の部分負荷で運転され、供給混合気は A/F = 16 の希薄混合気でブルーフレーム燃焼が行なわれる条件である。

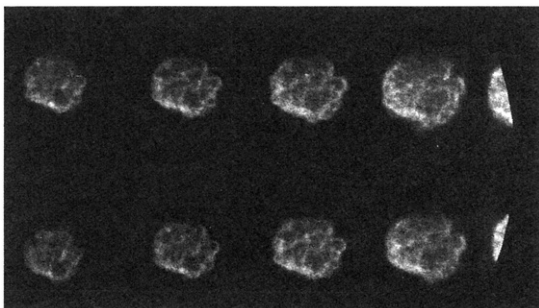


図 2(a) Fluorescent screen image
taken by the ASA 3000 film

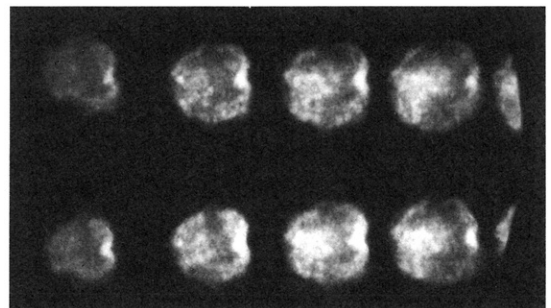


図 2(b) Digital video copy image
obtained by the SIT camera

図 2 ブルーフレーム燃焼の画像比較 (1500 rpm, A/F=16, 4PS)

3.1. 輝度補正

図3に白色面を撮影した時のモニタ画像と、その面A-Aの感度特性を示す。

SITカメラはこうのように約20%のシェーディング特性を持つ為、取込み画像の輝度補正が必要である。

理論的には、各画素に補正を行なうのが正しいが、他のエンジン現象(例えばシリンダ圧力)測定作業時間に近い補正処理時間を得る為に、8コマ画像の各コマ毎の対角線上に定める2点の合計200画素の平均値を代表値として、8コマ画像のバックグラウンドレベルを一定輝度に合わせる方法を採用した。1万コマ撮影像では各コマ毎の火炎形状変化及び輝度変化が大きいのでこの方法で十

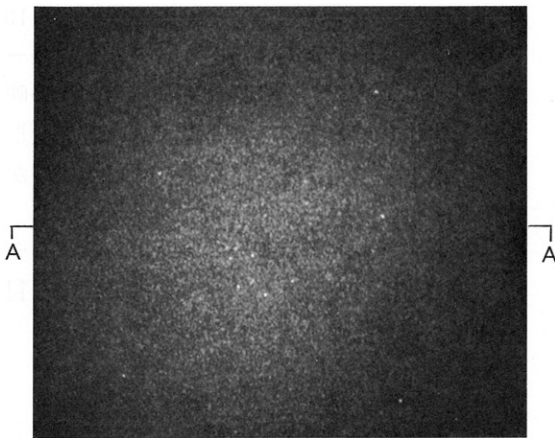


図3-a Image of CRT

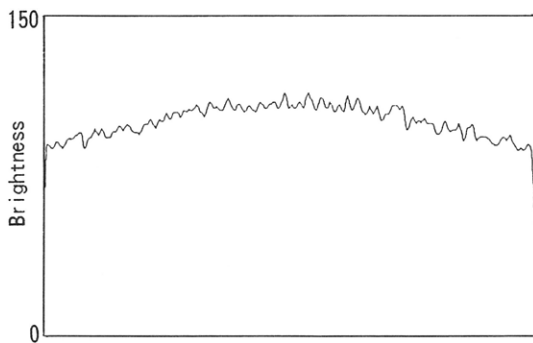


図3-b Brightness Distribution
at Section A-A

図3 SITカメラのシェーディング特性

分な補正効果が得られ、また処理時間を短縮する事が出来た。

3.2. フレーム輪郭取り

火炎画像とそのフレーム輪郭図を図4に示す。輪郭取りは先ず画像輝度を2値化処理し、チェーンコード方式で外周の画素位置をトレースして行う。輪郭図を求める事によりフレームの形状変化を観察出来るばかりでなく、面積割合を求めたり、予め定めた方向への火炎伝播割合を求め、火炎伝播特性を定量的に表現する事が出来る。図5はシリンダ中心から燃焼火炎が方向別に伝播する割合を示している。図の視野範囲は半径方向の72%に制限されており、それ以上の外側は観察出来ない。

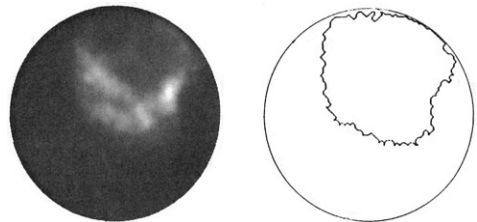


図4 火炎画像とフレーム輪郭図

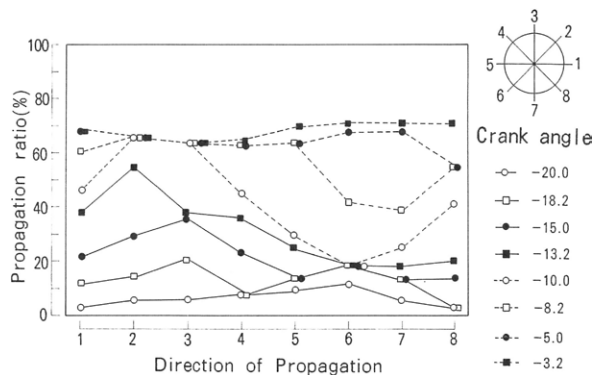


図5 燃焼火炎の方向別伝播割合

3.3. 輝度分布のカラー化

白色輝度分布図として得られた火炎画像の輝度分布を諧調表示し、カラーテーブルと対比して擬似カラー表示することにより、燃焼状態の評価を行ない易くする事が出来る。擬似カラーの色選択は紺谷ら⁽¹³⁾の手法に従っている。

3.4. 擬似動画表示

火炎伝播を動画として視覚的に観察する為に、メモリ上の16コマ画像を用いた擬似動画表示手法を開発した。この手法はメモリ上の拡大位置を順次切り替えて16コマを繰り返し擬似動画表示する方法である。これは異なったサイクルから切り出されたコマを組み合わせる用いるにもかかわらず、エンジン開発現場でテストエンジンの性能差を見る為の各フレーム変化を識別するには有効な手法である。

3.5. 高速度撮影の検証

得られた1万コマ/秒画像に対する露出時間の影響を確認する為、イメコン790の前部にIIを装着して10万コマ/秒で画像を採集し両者を図6に比較してある。露出時間による火炎形状差は少なく1万コマ/秒で燃焼計測を行なっても支障のないことが確認される。

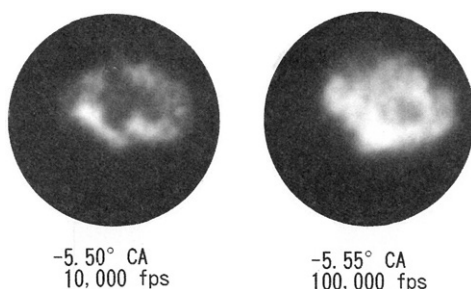


図6 1万コマ/秒と10万コマ/秒の画像比較

4. 結 論

内燃機関に於ける燃焼解析の補助ツールとして、ブルーフレーム領域の微弱発光燃焼火炎の高速度撮影システムを開発した。本装置はエンジンテストセルサイドに設置し、燃焼室形状開発のリアルタイムツールとして有効に使える事が確認出来た。

それらをまとめると次の通りである。

- (1) 1万コマ/秒の高速フレーミングで1,000 cd/m^2 の微弱光を撮影出来る高速・高感度撮影システムが、フレーミング型イメージコンバータカメラとSIT管を用いた電子撮影方式で達成された。
- (2) このシステムで火花点火機関の希薄予混合燃焼の火炎形状が撮影出来たので、デジタル画像処理により火炎フロント面の伝播を定量化する手法が開発された。
- (3) SITカメラのシェーディング特性を補正する為に、1コマ毎の輝度差を補正する手法を採用した。この簡易な手法によって得られた火炎形状でも、火炎挙動の解析に使用出来る事が分かった。
- (4) イメージインテンシファイヤを接続した10万コマ/秒の超高感度撮影システムでブルーフレームを撮影した結果、1万コマ/秒の映像と対比して輝度分布から推定される火炎形状に大差がなく、露出時間の影響のない事が確認出来た。
- (5) 擬似カラー動画表示する事により、エンジン開発現場でもリアルタイムで火炎伝播を目視し、判断し得る事が判った。

謝 辞

本システムの開発に当たり御助言をいただいた通産省工業技術院、電子技術総合研究所山下幹雄氏、機械技術研究所紺谷和夫氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) Yagi, S., K. Nakagawa, A. Ishizuya, and Y. Sato (Aug, 1968) Study in the Development of Exhaust Emission Controls for Small Displacement Honda Engine. SAE Paper 680527
- (2) Yagi, S., A. Ishizuya, and I. Fujii (1970) Research and Development of High-Speed, High-Performance, Small displacement Honda Engine. SAE Transactions, Vol. 79 paper 700122

- (3) Maly, R., and G. Ziegler (1982) Thermal Combustion Modeling-Theoretical and Experimental Investigation of the knocking Process. SAE Paper 820759
- (4) Lightfoot, N. S., and C. R. Negus (1983) Investigation of the knock Phenomenon in an Optically-Accessed Engine. AERE-R 11097
- (5) Hayashi, T., M. Taki, S. Kojima and T. Kondo (1984) Photographic Observation of Knock with a Rapid Compression and Expansion Machine. SAE Paper 841336
- (6) Nakagawa, Y., Y. Takagi, T. Itoh and T. Iijima (1984) Laser Shadowgraphic Analysis of Knocking in S. I. Engine. SAE Paper 845001
- (7) Cuttler, D. H., and N. S. Girgis (1988) Photography of Combustion During Knocking Cycles in Disc and Compact Chambers. SAE Paper 880195
- (8) 稲森潤、柳漢呉、浅沼強、(1988. 6) “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
- (9) Steinberger, R. L., W. W. Marden, and F. V. Bracco, (1979) A Pulsed-Illumination, Circuit Television System for Real-Time Viewing of Engine Combustion and Observed Cyclic Variations. SAE Paper 790093
- (10) Kozuka, K., A. Saito, M. Otsuka, and K. Kawamura, (1981) Television System for viewing engine combustion processes and the image analysis. SAE Paper 810753
- (11) Iwashita, Y. and A. Saito, (1983) Observation of Knock Using a High Speed Shutter TV Camera System. SAE Paper 831696
- (12) 山下幹雄、小林俊介、石川満、(1985) “シンクロスキャンストリークカメラによる極微弱ピコ秒時間分解発光スペクトル計測”, 分光研究, 第34巻、第3号
- (13) Kontani, K. and S. Goto, (1983) Measurement of Soot in a Diesel Combustion Chamber by light. Extinction Method and In-Cylinder Observation by Highspeed Shadowgraphy. SAE Paper 831291

■ 著 者 ■



中 村 昭 壽



田 中 敦



結 城 一 敏