燃焼写真の画像処理による高圧噴射ディーゼル機関の燃焼解析* (スワールおよび噴射圧力の影響)

山口 郁夫^{*1}, 辻 村 欽 司^{*2}

Image Processing Analysis of Combustion for D. I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection (Effects of Air Swirl and Injection Pressure)

Ikuo YAMAGUCHI and Kinji Tsujimura

The analysis of combustion for D. I. diesel engine with high pressure injection has been investigated using a digital image processing technique by tracing history of flame luminosity distribution. The effects of air swirl and injection pressure on turbulence intensity, turbulence scale and turbulent mixing rate were examined. As a result, it becomes clear that with high swirl ratio, combustion deteriorates because of the lower turbulent mixing rate in the later period of injection, and that with high pressure injection, combustion improvement is obtained through the increase of turbulent mixing rate at the early stage of diffusion burning.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Digital Image Processing, Turbulent Mixing, Turbulence Intensity, Turbulence Scale, Air Swirl, Injection Pressure

1. ま え が き

ディーゼルエンジンの主燃焼部は、燃料と空気の乱流混合に律速され、シリンダ内ガス流動および乱れが重要な影響を及ぼしている。そのため高効率で清浄な燃焼を実現するには、これら乱流混合に係わる現象を詳細に把握し、有効に利用することが必要である。

しかし、ディーゼルエンジンの燃焼中での流動や乱れを従来の熱線流速計やLDV等の方法で測定することは困難で実測した例は極めて少ないようである。

前報⁽¹⁾においては、直接噴射式ディーゼルエンジンの火炎の高速度写真を画像解析することにより燃焼中のガス流動および乱れなどの測定を試みた。用いた方法は塩路・池上⁽²⁾によって開発されたもので、火炎の変動とガス流動との相似性を仮定することにより、2枚の火炎写真の輝度むらをトレーサとして、その動きを画像濃度の相互相関係数の値やその極大値を

示す位置を検出することにより、流動(平均流)や乱れ強さを求めた。また、これを展開して自己相関係数の変化により乱れ積分スケールを求め、これを乱れ強さと関連させることにより乱流混合速度を推定した。

筆者らは、高圧噴射によりディーゼルエンジンの燃焼の改善、排出ガスの清浄化、性能向上を進めているが、本研究は、上記の画像処理による解析手法を使って高圧噴射ディーゼルエンジンの燃焼に及ぼすスワールや噴射圧力の影響について調査し、流動や乱流混合の観点より、これらの影響を明らかにした。

なお、本解析では視線方向の画像むらを用いているので、測定点での定量的な評価には無理があるが、定性的な傾向の議論は可能であると考えている。

2. 画像処理手法

ここでは本手法の概要を述べる^{(2), (3)}。

(1) 流動 高速度写真の画像濃度むらは、燃焼場に分布する火炎塊の時間変化に対応してこま毎に変化する。図1は隣接した2画像の例であり、ガス流動に伴って火炎塊が移動する様子が示される。この輝度分布の相互相関係数を利用してこの動きを検出する。すな

* 平成4年4月1日 第69回通常総会講演会において講演、原稿受付 平成5年3月29日。

*¹ 正員、(財)日本自動車研究所 (〒305 つくば市荻間 2530)。

*² 正員、(株)新エーシーイー (〒305 つくば市荻間 2530)。

(a) Base Image (b) Next Image in Δt Interval

Fig.1 流速および乱れ測定のための火炎画像

わち、ベース画像上で処理領域を決め、次の画像との相互相関係数を計算し、極大値 S_0 を示す位置よりこま間の時間間隔 Δt における移動距離を求め、速度ベクトルを求める。

(2) 乱れ強さ 火炎の流動を調べた燃焼写真の2点の測定視野の輝度値の発生頻度分布が類似していると、輝度値の空間分布の変化は乱れにより影響される。火炎塊の拡散速度が標準偏差 σ_i の正規確率密度関数 $P(\Delta x, \Delta y)$ に従うと仮定して、 σ_i に対し、ベース写真の処理領域内の全画素について、移動距離 Δx , Δy を求め、その点の輝度値と変更した仮想画像を作成する。次に、これとベース画像との相互相関係数 S_i を計算し、流動解析時に得られた相互相関係数の極大値 S_0 と一致する場合の標準偏差 σ_0 を求める。この σ_0 は乱流によってランダムに運動する火炎塊の平均拡散距離を意味するので、 $\sigma_0/\Delta t$ より平均拡散速度（乱れ強さ）が推定できる。なお、従来の熱線風速計やLDVなどで求めている乱れ強さは時間的な値から求めているのに対して、上記で求めた値は空間的な値を示す。

(3) 乱れスケール 燃焼写真のベース画像上で速度ベクトルの方向に距離 (X) に対して自己相関係数 (Y)

を求め、ベース画像の輝度濃度の変化より、 $Y = \exp(-X/L)$ が成り立つような L を乱れ積分スケールと定義して求める。

(4) 乱流混合速度 乱流場において、空気と燃料が混合する過程は、乱れが次第に均一化する過程と同様に考え、渦崩壊モデルと類似させると、乱流混合速度は（乱れ強さ/ L ）に比例する⁽⁴⁾ ので、前述した乱れ強さと L より乱流混合速度を求めることができる。

3. 実験条件および実験装置

エンジン諸元を表1に、燃焼システム諸元を表2に示す。高圧噴射方式の燃焼チューニングを行った結果、小噴孔径 (0.17mm) のノズルと浅皿燃焼室の組み合わせが優れていたのを、これをベースにした。図2に本研究で使用したエンジン燃焼室の概略図および噴射方向を示す。タイプA, B, Cはスワール比0.9の低スワールの燃焼システムで最高噴射圧力がそれぞれ200, 150, 100MPaのデルタ型の噴射圧波形を持つ噴射装置⁽⁵⁾を使った燃焼システムである。タイプDは列型ポンプを使ったタイプで最高噴射圧は65MPaである。タイプE

Fig.2 燃焼室概略図

Table.1 エンジン主要諸元

Type of Engine	Single Cylinder 4-Stroke D. I. Naturally Aspirated
Bore×Stroke	135mm×140mm
Displacement	2004cm ³
Comp. Ratio	16.5

Table.2 燃焼システム諸元

Type of Combustion	A	B	C	D	E
Injection Pressure	200MPa	150MPa	100MPa	65MPa	150MPa
Injection Pump Sys.	HPIE	⇐	⇐	JERK	HPIE
Swirl Ratio	0.9	⇐	⇐	⇐	2.6

は150MPaのスワール比2.6の高スワールタイプである。

スワール比の影響はタイプ Bと E, 噴射圧力の影響はタイプ A, B, C, D を用いて実験を行った。

撮影方法としては, ピストンに石英ガラスを取付けキャビティ内全域を撮影可能とし, その1/4部分をピストン下方より拡大し撮影した。撮影速度はスワール比の影響を調査した時は, 測定精度を上げるために35000fpsで, 噴射圧の影響を調査した時は6000fpsで, 相方とも高解像度の白黒フィルムを用いて, 直接撮影を行った。測定した時間間隔はそれぞれ0.34度および1.0度である。測定点はキャビティ内の活発に燃焼している場所36点を選定した。なお撮影時のエンジン回転速度は1000rpm, 空気過剰率は1.25, 噴射開始時期は $4^{\circ} \sim 5^{\circ}$ BTDCである。

4. 実験結果および考察

4.1. スワールの影響

(1) 流動 スワール比を変えた高圧噴射エンジンの性能試験では, 低スワール比の方が図示燃費, NO_x , スモーク濃度とも良く, スワール比を増加するとそれぞれ悪化の傾向を示していたが, この原因については余り明確ではなかった⁽⁶⁾。そこで, この原因を解明するために, 流動および乱流混合の観点より解析した。

スワール比0.9および2.6における火炎の時間経過の直接写真およびそれらを画像処理して求めた各測定点での速度ベクトルを図3に示す。図中には, 速度ベ

クトルの方向および大きさを矢印(→)で示す。噴射後はほぼ4度に火炎が検出できる。図示したクランク角(以後C.A.と呼ぶ)2度の火炎の動きは, キャビティ壁面に衝突した後, 反射して中央に向かう動きやキャビティ壁面に沿って動くウォールジェットが見られる。スワール比2.6の方がスワール比0.9よりもスワール方向のウォールジェットが大きく, キャビティ中央に向かう動きの小さいことが観察できる。C.A. 6度では, 左右2つのウォールジェットが衝突するので, それぞれのスワール比において, 火炎はキャビティ壁面周辺を被い, キャビティ中央に向かっている。噴射終了後は噴霧の運動量が弱くなるので, C.A. 10度および14度の火炎の動きが示すようにスワールによって全体的に流される。この時期においてはスワール比の違いによる速度ベクトルの差は余り顕著ではない。

(2) 乱れ強さ スワール比0.9および2.6におけるキャビティ内各測定点の乱れ強さを図4に示す。図中には, 乱れ強さの大きさを記号(○)で示す。C.A. 2度の乱れ強さは, 火炎を含む噴霧内および空気との境界において大きく, 一方火炎の存在しない測定点では小さい値を示すために, キャビティ内では空間的な変動が大きくなる。C.A. 6度の乱れ強さは, 火炎の存在している測定点においてはC.A. 2度の大きさよりも全体的に減少する。また空間的な変動も小さくなる。C.A. 8度において乱れ強さは, さらに小さくなる。このクランク角度においては, 高スワール比の方が乱れ強さが小さくなりスワール比の影響が顕著に表れる。

Fig. 3 スワール比の違いによる直接火炎写真と速度ベクトルの変化

Fig. 4 スワール比の違いによる乱れ強さの変化

次に、同一クランク角度の36の各測定点の乱れ強さを単純平均した値の時間変化を図5に示す。スワール比の違いによる乱れ強さは、C.A. 4度以降12度までは低スワール比の方が大きい値を示す。

(3) 乱れ積分スケール 同一クランク角度の36の各測定点の乱れ積分スケールを単純平均した値の時間変化を図6に示す。スワール比の違いによる乱れ積分スケールは、C.A. 6度以降に高スワール比が右上がりの傾向を示すのに対して、低スワール比の場合は高スワール比に比べて余り大きくない。すなわち、高スワール比の方が早期に乱れが消散し、均質化が達成していると考えられる。C.A. 14度において乱れ積分スケールが低下しているが、これは火炎の消滅が見られ、検出感度が悪くなった影響である。

(4) 乱流混合速度 前述した乱れ強さおよび乱れの積分スケールより求めた乱流混合速度の時間変化を図7に示す。また、同時に測定した1サイクルのシリンダ内圧より求めた熱発生率の時間変化を図8に示す。

拡散燃焼初期においてはスワール比の違いによる乱流混合速度の差は少ないが、噴射後半において、高スワール比の方が低下している。この傾向は噴射後半以後の熱発生率の結果と良く一致している。すなわち、高スワールの方が噴射後半で乱流混合速度が低下するために熱発生が少なく、再燃焼が少ないことが考えられる。

次に、乱流混合速度の場所による違いについて調べた結果を示す。噴霧軸上の測定点の違いにおける乱流

Fig. 5 スワール比による乱れ強さの時間変化

Fig. 6 スワール比による乱れスケールの時間変化

Fig. 7 スワール比による乱流混合速度の時間変化

Fig. 8 熱発生率に及ぼすスワール比の影響

(a) Swirl ratio:0.9

(a) Swirl ratio:0.9

(b) Swirl ratio:2.6

(b) Swirl ratio:2.6

Fig. 9 乱流混合速度に及ぼす測定位置の影響
(噴射方向)Fig. 10 乱流混合速度に及ぼす測定位置の影響
(スワール流方向)

混合速度の時間変化を図9に示す。(a)はスワール比0.9, (b)はスワール比2.6の結果を示す。スワール比0.9場合、ノズルから30mmの点の乱流混合速度は他の測定点よりも大きい値を示す。一方スワール比2.6の場合は、C.A. 0度ではノズルに近い方が乱流混合速度が大きい、6度以降は全体的に大幅に低下している。

これはスワール比0.9よりも乱れ強さが小さく、乱れ積分スケールが大きくなることによる。

ノズルからの距離30mmの点でスワール方向の角度が異なった測定点の乱流混合速度の時間変化を図10に示す。(a)はスワール比0.9, (b)はスワール比2.6の結果を示す。スワール比0.9の乱流混合速度は、噴霧軸上

Fig. 11 噴射圧力による乱れ強さの時間変化

Fig. 13 噴射圧力による乱流混合速度の時間変化

Fig. 12 噴射圧力による乱れスケールの時間変化

Fig. 14 熱発生率に及ぼす噴射圧力の影響

の点が大きく、噴霧軸から離れる程小さくなる。一方スワール比2.6の乱流混合速度は、スワール比0.9に比べ全体的に小さい値を示す。

高スワールの場合はスワールにより火炎が広範囲に流されるので、乱れ強さや乱流混合速度が小さい値になるのに対して、低スワールの場合は乱流混合が活発な領域が確保されているためと考えられる。

4.2. 噴射圧力の影響

低スワール比、同一噴射時期で噴射圧力200, 150, 100, 65MPaにおける燃焼室内各部における速度ベクトルや乱れ強さについては、すでに報告してある⁽³⁾。

それによると流動に関しては、噴射圧力が高くなると噴霧の運動量が増大するために噴射方向の動きやキャビティ室壁面で衝突した後の動きが大きくなる。噴射後は運動量の減少と火炎温度の上昇のために流動は急激に減少し、また均一化される現象が見られる。一方、噴射圧力が低い場合には移動量も少なく、また燃焼行程のかなりの遅くまで不均一性が保たれている。

また乱れ強さに関しては、噴射圧力が高くなるとノズルから離れたキャビティ壁周辺で乱れ強さは大き

く、また拡散燃焼後は燃焼室内で均一化するなどの様相を示し、一方、噴射圧力が低い場合ノズルに近い場所の方が大きく、場所によるバラツキが長い期間大きいなどの様相を示している。

ここでは、測定点36点の平均値を示す。乱れ強さ、乱れ積分スケール、乱流混合速度の時間変化の状態をそれぞれ図11, 12, 13に示す。同時に測定した1サイクルのシリンダ内圧より求めた熱発生率の時間変化を図14に示す。

なお、65MPaにおいて噴射期間が他の噴射圧力より長いのは、列型ポンプを使用した影響による。

図11の乱れ強さは、拡散燃焼の初期には噴射圧力が高い程乱れ強さが大きい、燃焼後半には噴射圧力の影響が少なくなる。しかし、65MPaの場合の乱れ強さは、拡散燃焼の前半では小さくほぼ同じ値を示す。

図12の乱れ積分スケールは200, 150, 100MPaの場合、時間経過に従って全体的に増加する。しかし、65MPaでは、噴射後半においても乱れ積分スケールが増加していないことから燃焼の広がりが遅いことを示す。

図13の乱流混合速度は、高圧になる程拡散燃焼初期には乱流混合速度が大きくなるが、噴射終了付近より

200, 150, 100 MPa の差がなくなり全体的に低下する。一方、65MPaでは拡散燃焼初期の乱流混合速度は小さいが、拡散燃焼中期には火炎が広がり乱流混合速度が増加する。C.A. 15度では、噴射圧力65MPa 以外の圧力の燃焼は大半が終了しているので乱流混合速度が小さくなるので65MPaの方が大きくなる。

図14の熱発生率は、拡散燃焼の初期において噴射圧力が高い程大きな値を示し、その傾向はスワール比の影響を調べた実験と同様に乱流混合速度と同じである。

従って、噴射圧力の差による燃焼の違いの一因は、乱流混合速度の差異によると考えられる。

6. ま と め

画像処理を用いて、乱流混合の観点より高圧噴射ディーゼルエンジンの燃焼解析を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 噴射圧力およびスワール比の違いによる燃焼状態の差異の一端は乱流混合速度の時間経過で説明できる。
- (2) 高スワール比の場合、噴射後期に乱流混合速度が低下するために熱発生率が低下する。
- (3) 高圧噴射の場合、乱流混合速度は拡散燃焼初期で噴射圧力が高い程大きくなる。しかし、噴射終了時以降には、高圧噴射の影響が少なくなり低圧噴射の場合よりも小さくなる。これは熱発生率の傾向と似ており、拡散燃焼初期における高圧噴射の熱発生率の増加の一因は乱流混合速度の増加によると考えられる。

本研究において(株)新燃焼システム研究所の元研究課長新谷元宏氏、元研究員南利貴氏、加藤哲郎氏、春藤茂氏、中平敏夫氏および(株)日本自動車研究所の小林伸治氏、加賀美公彦氏のご支援、ご協力を得た。また京都大池上教授および塩路助教授には本手法について御指導していただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 山口ほか、高圧噴射方式ディーゼルエンジン燃焼場における流動および乱れの画像処理による解析、自動車技術論文集, Vol. 23 No. 2, April 1992, 15.
- (2) 塩路ほか、画像処理によるディーゼル火炎の解析、機論, 54-504, B (1988-8), 2228.
- (3) I. Yamaguchi et al., An Image Analysis of High Speed Combustion Photographs for D.I. Diesel engine with High Pressure Fuel Injection, SAE Paper 901577
- (4) M. Shioji et al., Characterization of Soot Clouds and Turbulent Mixing in Diesel Flames by Image Analysis, COMODIA 90, (1990), 613.
- (5) T. Minami et al., Analysis of Fuel Spray Characteristics and Combustion Phenomena under High Pressure Fuel Injection, SAE Paper 900438.
- (6) S. Shundoh et al., A Study on Combustion of Diesel Engine with 150MPa Injection Pressure, COMODIA 90, (1990), 607.