筒内噴射エンジンにおいて噴霧特性が 混合気・燃焼挙動に及ぼす影響の数値解析*

木原 裕介^{*1}, 助川 義寛^{*1}
野木 利治^{*1}, 藤枝 護^{*2}

Numerical Analysis of Fuel-Air Mixture and Combustion Gas Behavior influenced by Spray Characteristics in Direct Injection Gasoline Engine

Yusuke KIHARA^{*3}, Yoshihiro SUKEGAWA,
Toshiharu NOGI and Mamoru FUJIEDA

^{*3} Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory, 2520 Takaba, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-8503 Japan

Influences of fuel spray characteristics on mixture and combustion behavior in a direct injection Gasoline engine were studied. Fuel-Air mixture and combustion gas behavior was calculated by numerical simulation. From this study we obtained following results. By using skewed type spray, amount of attached fuel on a piston at stratified charge operating mode is less than the case of non-skewed type spray. This leads to faster flame propagation near a piston surface.

Key Words: Stratified Charge Engine, Combustion, Spray, Numerical Analysis, Computational Fluid Dynamics, Direct Injection, Mixture Formation

1. 緒 論

自動車から排出される炭酸ガスを低減するため、低燃費エンジンの開発が望まれている。筒内直接噴射ガソリンエンジン(DIエンジン)は希薄燃焼運転が可能であり、低燃費エンジンとして期待されている。DIエンジンにおいて希薄な混合気を安定に燃焼させるためには、筒内の混合気分布を適切に制御する必要がある。このためには燃焼室内で生じている現象の理解が不可欠であるが、高速で回転するエンジン内部を詳細に観察することは難しく、観察領域や測定物理量が限られているのが現状である。このような状況の中で、混合気・燃焼数値シミュレーションは空気流動や混合気挙動の観察を可能とし、燃焼室内の現象解明や混合気の制御手法を見出す上で非常に有効である。

著者らは、DIエンジン燃焼室内での現象解明を目的に、燃料噴霧、混合気、燃焼を数値解析するための流体シミュレーションプログラムを開発し^①、このプログラムを用いてDIエンジンの混合気分布、燃焼特性について解析してきた。

本報では燃料の噴射方向について着目し、燃料噴射弁の

ノズルを噴射弁中心軸に対し斜めにすることによって生成される偏向噴霧を用いた場合の混合気分布と燃焼特性について評価した。

2. おもな記号

C : 反応進行度(-)
 C_p : 定圧比熱(J/kgK)
 P : 圧力(Pa)
 S_L : 層流燃焼速度(cm/s)
 T : 温度(K)
 Φ : 当量比(-)
 δ : 層流火炎帯厚さ(m)
 λ : 熱伝導率(W/mK)
 μ : 粘性係数(Pa·s)
 ρ : 密度(kg/m³)
 ω : 反応速度(kg/s·m³)

添 字

O : 標準状態での物理量を表す
 t : 乱流での物理量を表す
 u : 未燃焼混合気の物理量を表す

* 原稿受付 2001年10月15日。

^{*1} 正員、日立製作所日立研究所(〒319-1292 日立市大みか町7-1-1)。

^{*2} 正員、日立カーエンジニアリング(〒319-1292 日立市高場2520)。

E-mail: ykihara@hrl.hitachi.co.jp

3. 数 値 計 算 手 法

吸気ポート及びシリンダ内の空気、燃料蒸気、燃焼ガスの流動は、圧縮性流体に対する質量、運動量、エネルギーの各保存式を数値的に解くことによって求めた⁹⁾。燃料の気化及び燃焼によるガス組成の変化を考慮するため、混合気、燃料蒸気、燃焼ガスの3つの質量保存式を解いた。乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデル¹⁰⁾を使用した。各輸送方程式は有限体積法により離散化し、FLIC法¹¹⁾により時間方向に積分した。乱流エネルギーと散逸率の対流項は一次精度の風上スキームを用い、他の保存式の対流項は二次精度のQUICKスキームを用いた。

ガソリンの燃焼反応はオクタンの酸化反応で模擬し、その化学反応式を以下の総括反応式で与えた。

乱流での燃焼速度は、稲毛らによって提案された燃焼モデル¹²⁾によって求めた。稲毛らのモデルでは、燃焼速度は次式で計算される。

$$\bar{\omega}_l = \rho_u \left(8 \frac{S_L}{\delta} + \frac{4\rho k}{3\mu_l} \right) C^2 (1-C) \quad \cdots(2)$$

$$\delta = \frac{4\lambda_i}{C_{pi} \rho_u S_L} \quad \cdots(3)$$

ここに添字の i は未燃ガスと既燃ガスの平均温度における物理量を表す。

層流燃焼速度は、Metghalchi ら¹³⁾によって提案されたオクタンの層流燃焼速度の実験式を用いた。

$$S_L = \left\{ 26.32 - 84.72(\Phi - 1.13)^2 \right\} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^a \left(\frac{P}{P_0} \right)^b \quad (cm/s)$$

$$a = 2.18 - 0.8(\Phi - 1)$$

$$b = 0.22(\Phi - 1) - 0.16 \quad \cdots(4)$$

燃料噴霧の運動は離散粒子法(DDM)によって計算した。DDMでは個々の液滴はパーセルとして取り扱われる。1つのパーセルは粒径、速度、温度の等しい複数の液滴によって構成される。各パーセルの運動は、運動方程式を二次精度のオイラー法を用いて解くことによって求めた。パーセルと混合気間の質量、運動量、エネルギーの交換を考慮した。

壁面に衝突した液滴の取り扱いには Wakisaka らのモデルに従い、入射ウェーバー数によって衝突後の反射速度、方向、粒径を決めた。

4. 自由噴霧シミュレーションの検証

4.1 目的と実験装置及び条件

本シミュレーションの妥当性を検証するため、自由噴霧のシミュレーションと可視化実験結果を比較した。

実験で用いた定容容器は直径 200mm、高さ 300mm の円筒形で、燃料噴射弁が上部中央に設けられ、側面には2つのアクリル製の窓(直径 96mm、厚さ 25mm)を備える。波長 515nm、出力 3W、シート圧 2mm のアルゴンレーザーをアクリル窓から噴霧に照射し、その散乱光を毎秒 4500frame の高速度ビデオカメラで撮影する。

燃料噴射弁に供給される燃料は、高圧ポンプによって 7MPa まで加圧される。燃料噴射弁はスワール式を用いた。燃料にはセルロースを使用し、噴射パルス幅は 1ms とした。

雰囲気気圧が、大気圧と高圧での噴霧挙動を観察するため、高圧条件では窒素ガスを充填させた容器内の圧力を 0.6MPa まで加圧した。

4.2 計 算 条 件

シミュレーションでは定容容器を 1 辺 110mm の立方体で模擬し解析メッシュを作成した。燃料の噴射位置は実機と同じく上部中央とした。

噴霧の初期条件は大気圧下の自由噴霧における粒径分布、流量分布の実測値を用いた。大気圧下での噴霧角は約 70°、ザウター平均粒径は約 20 μm である。雰囲気気圧は、大気圧と 0.6MPa の2条件について計算した。

4.3 シミュレーションと実験結果の比較

自由噴霧のシミュレーションと可視化実験結果を比較した。噴霧挙動を比較した結果を図 1 に示す。(a)は雰囲気気圧が大気圧、(b)は雰囲気気圧が 0.6 MPa の場合の結果である。上段はシミュレーション、下段が可視化実験結果を示し、シミュレーション結果は噴霧点から幅 2mm に含まれる燃料噴霧のみ表示している。

噴霧挙動を観察すると、大気圧下条件では噴霧は円錐状となり噴霧の空間的な広がりは大きくなるが、加圧下条件では噴霧の外縁部は渦流によって噴霧が巻き上がり、噴霧の空間的な広がりには抑制される。これは、雰囲気気圧が高くなると噴霧と空気のせん断応力が強く働くためである。このような雰囲気圧力による噴霧挙動の違いをシミュレーションで再現できており、シミュレーションで得られた噴霧形状は可視化実験結果とほぼ一致している。

燃焼を制御する上で重要なパラメータの1つである噴霧ペネトレーションについてシミュレーションと実験結果を比較した結果を図 2 に示す。横軸は燃料噴射から経過した時間を、縦軸は噴霧点から噴霧先端までの距離を表す。シミュレーションと実験の噴霧ペネトレーション

(a) Atmospheric condition

(b) Pressurized condition (0.6MPa)

Fig.1 Comparison of spray shape between simulation and experiment

Fig.2 Comparison of fuel spray penetration

は一致しており、本シミュレーションにより詳細な噴霧挙動が計算できることを確認した。

5. 噴霧・混合気挙動と燃焼特性解析

5.1 計算体系及び条件

燃料の噴射方向の影響を解析するため、スワール式燃料噴射弁のノズル噴孔を斜めに設けた噴射弁と、ノズル噴孔を中心軸に対し真直ぐ設けた噴射弁を用いた場合の噴霧・混合気挙動と燃焼特性を比較した。以下、ノズル噴孔を斜めにした場合の噴霧を偏向噴霧、偏向がないものを標準噴霧と記す。

解析対象のエンジン形状を図3に示す。1気筒の排気量500cc、圧縮比11、ボア径93mm、ストローク73.3mmの4バルブエンジンである。2本の吸気管の間に、キャビティ底部の平面に対して36°の傾きで燃料噴射弁を設け、点火プラグは燃焼室上部中央に設置した。偏向噴射弁はノズル噴孔の偏向方向が点火プラグへ指向するように設置した。ピストン冠面の吸気側寄りに、直径と深さの比が9:2の円形キャビティを設けた。成層運転時には吸気ポートの片側に設けたスワール制御弁を閉じ、燃焼室内に強いスワール流を生成する。

計算範囲は吸気行程から膨張行程までとし、空気流動と燃料挙動、及び燃焼火炎について計算した。2本の吸気管の片側のみに境界条件を与えることによりスワール制御弁の全閉状態を模擬した。燃料噴射時期は上死点前80°~50°ま

Fig.3 System of direct injection engine

で10°毎の4ケースとした。エンジン回転数1400rpm、空燃比40である。計算では偏向噴射弁からの燃料噴霧を模擬するため、燃料噴射方向をノズル噴孔の偏向角度と同じだけ傾け、且つ噴霧ペネトレーションが実測値と一致するように速度分布を与えた。粒径分布は大気圧下の自由噴霧における実測値を用い、ザウター平均粒径は約20μmである。大気圧下での噴霧角は約70°、ノズルの偏向角は7°である。

偏向噴霧の自由噴霧挙動について計算し、可視化実験と比較した結果を図4に示す。大気圧、加圧下における噴射から18ms後の噴霧挙動を示し、噴霧形状と噴霧ペネトレーションL1とL2が一致していることを確認した。L1はL2の約1.2倍になっている。なお、標準噴霧におけるペネトレーションは偏向噴霧のL2とほぼ同じ長さである。

Fig.4 Comparison of skewed spray simulation (1.8ms after injection start)

5.2 空気流動速度分布

圧縮行程後期における空気流動速度ベクトルを図5に示す。(a)は上死点前 40° においてピストンが上死点位置での水平断面を、(b)は上死点前 20° におけるシリンダ中心断面を示す。

Fig. 5 Air flow pattern

水平断面の速度ベクトルを見ると、シリンダ外縁部のスワールの他にキャビティ内にも強いスワールが生成されていることが分かる。本エンジン形状において、ピストン下死点におけるスワール数は約 20、上死点前 60° におけるスワール数は 12 となった。このようにキャビティ内にスワールが生成される理由は、キャビティをオフセットして設けることにより圧縮行程後期における燃焼室に占めるキャビティ体積割合が増加し、シリンダ外縁部のスワールがキャビティ内に流れ込むためである。シリンダ中心断面の速度ベクトルを見ると、キャビティ周縁部に上昇流が生じていることが分かる。この上昇流が生成される原理を図6により説明する。

Fig. 6 Principle of stratified charge by swirl flow

シリンダ内にスワールが存在する場合、スワールの気流速度は外側に向かうにつれて速くなり、圧力は外側が高く、中心部は低くなっている。この時、キャビティの周縁部がシリンダ内のスワールの中心になるようキャビティを配置すると圧力差によって上昇流が生成される。成層運転時にはこの

上昇流によってキャビティ内で気化した燃料が燃焼室上部にある点火プラグ周りへ搬送され成層燃焼を可能としていると考える。スワールの有無による混合気分布を比較した結果を図7に示す。この結果は、下死点においてシリンダ内に剛体渦と仮定したスワールを与えて圧縮行程だけを計算したもので、(a)は初期スワール数が2、(b)は空気流動無しであり、混合気は空燃比が 20 以下の領域を示している。回転数は 2000rpm、燃料噴射時期は上死点前 40° 、観察時期は上死点前 10° である。スワール流2の条件では混合気がキャビティ上方まで到達しているが、スワール流が無い場合は混合気が殆ど上昇しておらず、上記の上昇流が生成される原理が正しいことを確認した。

Fig. 7 Difference of fuel vapor distribution by swirl number

5.3 燃料噴霧及び燃料・空気混合気の挙動

燃料噴霧、空燃比分布のシミュレーション結果を図8に示す。条件は標準噴霧でエンジン回転数 1400rpm、燃料噴射時期上死点前 70° 、空燃比は 40 である。空燃比はシリンダ中心断面の分布である。圧縮行程後期に噴射された燃料がキャビティ内に入り、気化した燃料がキャビティ内で混合気を形成している。上死点前 20° では殆どの燃料が気化しており、気化した燃料がキャビティ周縁部から点火プラグに向けて上昇し、点火プラグ周りで成層化していることが分かる。

Fig. 8 Fuel spray behavior and air fuel ratio distribution

偏向噴霧における燃料噴霧、空燃比分布のシミュレーション結果を図9に示す。エンジン回転数 1400rpm、燃料噴射時期上死点前 70° 、空燃比 40 である。偏向噴霧と標準噴霧の空燃比分布について比較すると、偏向噴霧では混合気が短い時間で点火プラグに到達しており、偏向噴霧では着火可能な点火時期が早くなることが考えられる。点火プラグに到達した混合気へ着火する場合、失火することなく安定して火炎が伝播するためにはプラグ周りの燃料濃度が重要であると考えられる。そこで、シミュレーションによりプラグ周りの燃料濃度を観察し、安定に燃焼する期間を評価した。

Fig. 9 Fuel spray behavior and air fuel ratio distribution by skewed spray

評価指標として層流燃焼速度に注目した。層流燃焼速度は火炎の伝播速度を表し、速度が遅くなると点火しても火炎伝播せず失火すると考えられる。そこで、空燃比に対する層流燃焼速度を(4)式により計算した。温度 T_u 及び圧力 P は、一般的に最適とされる点火時期である上死点前 20° の値を用いた。本条件での T_u は 609K、 P は 1.25MPa である。ここで、安定に燃焼するために必要なプラグ周りの燃料濃度を、層流燃焼速度の最大値の 50% 以上となる空燃比と定義した。本条件では、層流燃焼速度の最大値は 86cm/s であり、層流燃焼速度が最大値の 50% 以上となるためには、空燃比が 9.6~20 である必要がある。

シミュレーションによる燃焼安定領域の評価結果を図10に示す。(a)は標準噴霧、(b)は偏向噴霧の結果である。実験結果についても併記した。ここで示す実験結果は、図示平均有効圧力の変動率が5%以下の領域を表しており、この領域内では安定に燃焼したことを意味する。

シミュレーションでの点火プラグ周りの燃料濃度の傾向を見ると、燃料噴射一定時間後から徐々に上昇し、やがて空燃比 9.6 以下のリッチ状態になり燃焼できなくなっている。標準噴霧において計算結果と実験結果を比較すると燃焼安定領域は一致しており、この結果から、実験においても点火時期を遅くすると点火プラグ回りの空燃比がリッチ過ぎるために着火できないと考える。

Fig. 10 Comparison of stable combustion area

偏向噴霧において計算結果と実験結果の燃焼安定領域を比較すると、シミュレーションでは実験結果に比べて若干狭くなった。この理由は、噴霧によって生じる空気流動が偏向噴霧ではペネトレーションが長い分だけ速くなり、実験においてはこの空気流動が混合気を適度に拡散させることにより過度の燃料集中を抑制しているが、シミュレーションではメッシュサイズの問題からこの空気流動を過小評価したためと考える。

シミュレーション結果について、偏向噴霧と標準噴霧の噴射時期上死点前 60° の燃焼安定領域を比較すると、偏向噴霧は上死点前 27° で燃焼安定領域が存在するが、標準噴霧では上死点前 18° で燃焼安定領域が生じており、偏向噴霧の方がクランク角度で 9° 早い。これは、偏向噴霧の噴霧ペネトレーション L_1 が長いために標準噴霧に比べて早く混合気が到達するためと考える。また、偏向噴霧は噴射時期が上死点前 80° より早くなると燃焼安定領域が存在しない。これは、ペネトレーション L_1 が長く、標準噴霧に比べ燃料がピストンに到達するのが早く、その場合に噴霧がキャビティに入らなくなるためである。

5.4 燃焼解析結果

偏向噴霧と標準噴霧について数値シミュレーションにより燃焼解析した。熱発生率を図11示す。また、火炎の挙動を観察するため、上死点後 10° におけるピストン表面の既燃焼ガス質量分率を図12に示す。既燃焼ガス質量分率とは、全混合気に占める既燃焼ガスの割合であ

Fig. 11 Heat release rate

Fig. 12 Burned gas mass fraction on piston surface at 10degATDC

り、この値が1の場合、混合気が完全に燃焼したことを表す。エンジン回転数 1400rpm、燃料噴射時期上死点前 70°、空燃比 40、点火時期は上死点前 20°である。

熱発生を見ると標準噴霧は偏向噴霧に比べ最大値が低く、投入した燃料に対して十分な燃焼が行われていないことが分かる。既燃焼ガスの分布を比較すると、ピストン表面での既燃焼ガスの広がりほぼ一致しているが、標準噴霧ではキャビティ内に大きな未燃焼領域が存在しており、この未燃領域により熱発生率が低くなっていると考え。そこで、未燃焼領域が生じる理由を検討した。点火時期におけるピストン表面の空燃比分布を図 13 に、ピストンへの燃料付着量を図 14 にそれぞれ示す。

空燃比分布の結果を見ると、偏向噴霧ではキャビティ内の空燃比が理論混合比になっているのに対し、霧偏向噴霧では空燃比が 0.1 以上と高濃度の混合気が形成されている。ピストンへの燃料付着量を比較すると、標準噴霧は点火時期における燃料付着量が偏向噴霧に比べて 30% も多い。これらの結果から、霧偏向噴霧では燃料付着が多いために付着燃料から気化した燃料がキャビティ内にリッチな混合気を形成して未燃領域が生じ、熱発生が悪化したと考える。偏向噴霧では燃料の付着が少なく、火炎伝播が良いことがわかった。

6. 結 言

噴霧特性が混合気・燃焼挙動に与える影響を明らかにすることを目的に、数値シミュレーションにより、筒内の空気流動、液滴・混合気及び燃焼の挙動について解析した。本報では、燃料の噴射方向に着目し、燃料噴射弁

Fig. 13 Air fuel ratio on piston surface at ignition timing

Fig. 14 Difference of attached fuel amount by spray patterns

のノズルを噴射弁中心軸に対し斜めにすることによって生成された偏向噴霧を用いた場合の混合気濃度分布、燃焼特性について評価した。本研究における計算及び実験に用いたエンジン諸元において、計算結果より以下の知見を得た。

(1) 偏向噴霧では、ピストンへの燃料付着を標準噴霧に比べ 30% 低減でき、ピストン表面近傍の火炎伝播性が良い。

(2) 偏向噴霧では、噴霧の速度分布によって混合気が適度に分散し、標準噴霧に比べ着火可能期間が約 2 倍と長くできる。

(3) 自由空間中に噴射した燃料の噴霧挙動シミュレーションは可視化実験で得た噴霧形状及びペネトレーションと一致し、本シミュレーションの妥当性を確認した。

(4) シミュレーションで求めた点火プラグ周り空燃比から予測した燃焼安定領域と、実験から得られた燃焼安定期間は一致した。

参 考 文 献

- (1) 助川, 他 4 名, 機論(B), 63-609, (1997), 1846.
- (2) B. E. Launder, et al., Proc. NASA Conf. on Free Shear Flows, Langley(1972).
- (3) R. E. Gentry et al. J. of Comp. Physics, 1 (1966), 87.
- (4) 稲毛・大塚, 機論, 61-586, B(1995), 2290.
- (5) M. Metghalchi, J. C. Keck, Combust Flame 48 (1982).