1107 予混合圧縮着火機関における混合気形成過程に及ぼす噴射条件の影響

Effects of Injection Conditions on Mixture Formation Processes in a Premixed Compression Ignition Engine

○Je-Hyung Lee (NEDO, 機械技術研究所)
鶴島 理史 (株) 新エイシーイー

正 後藤 新一 (機械技術研究所)
正 脇坂 知行 (京都大学)

Je-Hyung LEE, Mechanical Engineering Laboratory, 1-2 Namiki, Tsukuba, Japan
Shinichi GOTO, Mechanical Engineering Laboratory
Tadashi TSURUSHIMA, New A.C.E. Co., Ltd.
Tomoyuki WAKISAKA, Kyoto University

The mixture formation process in a premixed compression ignition engine was numerically analyzed. This study aimed to find out effective injection conditions for lean mixture formation with high homogeneity, since the NO_x and soot emissions in the engine are closely related to the mixture homogeneity. To calculate fuel spray behavior, a practical computer code GTT (Generalized Tank and Tube) was employed. The effects of injection parameters, such as injection timing, initial droplet size, spray cone angle, injection velocity, nozzle type (pintle and hole) and injection position / direction, on the mixture homogeneity near ignition timing (or TDC) were investigated. This study concludes that high homogeneity lean mixture could be achieved with a pintle type nozzle by combining an advanced injection and small initial droplets in a small spray cone angle. Furthermore, the side injection concept with hole type nozzles using spray-to-spray impingement is effective for the lean near-homogeneous mixture formation.

Key Words: Simulation, Spray, Mixture formation, Premixed compression ignition engine

1. 序論

近年、ディーゼル機関におけるスモークおよび NO_x の同時低減に関する有望な方法の一つとして、燃料を従来の方式より非常に早い時期に噴射し、燃料と空気の混合気を圧縮によって着火させる予混合圧縮着火^[1]があげられている。予混合圧縮着火機関の実現には、均一な混合気形成が燃焼と排気の特性に大きな影響を与えるため、混合気形成の過程をより詳細に理解する必要がある。

そこで本研究では、数値解析により混合気形成過程に与える噴射条件の影響を調べた。計算では、噴射時期、初期液滴粒径、噴霧角度、噴射速度、ノズルタイプ、噴射位置および噴射方向を変え、これらが混合気の均一化に及ぼす影響を調べて、予混合圧縮機関における均一混合気形成の最適条件を求めた。

2. 計算方法と計算条件

予混合圧縮着火機関における混合気形成過程の数値計算には京都大学の脇坂らによって開発された GTT-コード (Generalized Tank and Tube)^[2]を用いた。本研究では、分裂モデルを含まず、着火直前までの混合気形成過程に注目して計算を行った。

予混合圧縮着火機関と想定したモデルエンジンの計算条件は以前の実験^[1]及び数値計算^[3]のデータに基づいた。シリンダ径: 135mm, 行程: 140mm, 圧縮比: 16.5, スワール比: 0.5 である。ピストンキャビティの形状は、図 1 に示す浅皿型 ($\phi=98$, $h=12$)、計算メッシュは $40 \times 40 \times 26$ とした。機関回転速度は 1000rpm、全体の空気過剰率は 2.9 と仮定した。空気の初期圧力および温度はそれぞれ下死点で 0.1MPa、355K とし、燃焼室全体の壁面温度は 400K とし圧縮行程中一定と仮定した。

噴射システムはアキュムレータ型、噴射圧は 100MPa とした。軽油燃料のホローコーン状噴霧はピントル型ノズルから一定の噴射率で圧縮行程中 (-80° ATDC) に噴射すると仮定した。この際、噴射速度 200m/s、噴霧角度 80° 、噴霧の広がり 10° は圧縮行程中で一定とした。初期の SMD は既報^[3]に基づいて $16\mu\text{m}$ とした。

混合気の均一化の程度を定量的に表現するため、均一化度 H. I. (Homogeneity Index) を各計算セル内燃料質量分の空間的な分布に基づいて式(1)のように提案した。

$$H. I. = 1 - \sigma / \sigma_{n.h.} \quad (1)$$

ここで、 σ は燃料質量分の標準偏差、 $\sigma_{n.h.}$ は完全不均一の場合の標準偏差を表す。完全不均一の場合は空気と燃料が混合していないことを意味する。すなわち、H. I. は完全均一の状態と完全不均一の状態でそれぞれ '1' と '0' になる。 $\sigma_{n.h.}$ は燃焼室内の全空燃比 (A/F) の関数で次式のように表すことが出来る。

$$\sigma_{n.h.} = \sqrt{A/F} / (1 + A/F) \quad (2)$$

3. 結果と討論

図 1 に、噴霧液滴分布、速度場および燃料蒸気濃度分布のクランク角度に対する変化を示す。図 1(a) から空気が噴霧の中に流入して噴霧の先端部が流されて行くことが分かる。この渦流動は互いに作用しながらピストンキャビティまで移動して、非常に大きい軸方向の流れが、図 1(b) の -75° や -70° ATDC で見られる。クランク角度の増加につれて液滴パーセルは燃焼室に広がって蒸発し、燃料の蒸気部が燃焼室全体に広がる。

噴射時期が混合気の形成過程に及ぼす影響を調べるため、噴射期間を 8°CA 一定とし、噴射時期を -120° から -40° ATDC まで変えて計算を行った。図 2(a) に示すように、早期噴射の場合、上死点近傍まで混合気形成過程の期間が長くなるため、十分な混合が進み、H. I. が高くなる。

図 2(b) に、初期液滴粒径が混合気の形成過程に与える影響について、初期液滴粒径を $12\mu\text{m}$ から $24\mu\text{m}$ まで変化した場合の結果を示す。初期液滴粒径が小さいほど液滴の蒸発が速くなるので、圧縮行程中で H. I. がより高くなる傾向が見られる。

混合気の形成過程に及ぼす噴霧角度の影響は、噴射速度を 200m/s 一定として噴霧角度 (cone angle) を 60° から 110° まで変えて調べた。図 2(c) に示すように、噴霧角度が 60° の場合の H. I. が、 80° の場合と比べて噴射後に高い値となっている。これは噴霧角度が小さくなるほど、噴霧速度のシリンダ軸方向成分が大きくなって、噴霧のキャビティへ衝突する効果が強くなる。このため、混合気の均一度が増加する傾向が見られる。こ

れに反して噴霧角度 110° の場合、混合気の大部分がキャビティよりは先にシリンダ壁に衝突するので衝突効果が弱くなり H. I. が非常に低い。従って、キャビティにおける燃料蒸気の強い衝突が混合気の均一化と蒸発の増加に効果があると言える。

図 2(d)に、噴射速度の混合気形成過程への効果を調べるため、同一燃料噴射量と噴霧角度条件で噴射速度を $100 \sim 300 \text{ m/s}$ に変えた場合の結果を示す。噴射速度を増加させると噴霧到達距離が長くなり、液滴の蒸発と共に混合を促進する。しかし、H. I. に及ぼす噴射速度の影響は他の噴射パラメータに比べて圧縮過程末期におけるあまり大きくない。

噴射ノズル・噴射位置及び噴射方向の組み合わせによる噴射方式の効果を調べるために、既報^[1]で用いたホールノズルのサイド噴射方式の場合における混合気の形成過程の計算を行った。図 3(-75° ATDC)にノズルの位置と方向を示す。燃料がシリンダ壁の近くに位置する 2 本のノズルからシリンダの中央領域に向かって噴射する。片方のノズルより噴射された 2 本の噴霧によって形成される角度は 40° 、シリンダ軸からの傾斜角度は 60° である。計算条件としては、ホローコーン状噴霧の場合と同じであるが、噴射速度は 390 m/s とした。

両側から噴射された燃料噴霧はシリンダ中央領域で衝突するので、噴霧到達距離が抑えられるともに微粒化が促進され、燃料と空気との混合が活発になる。図 3 には、混合気形成過程を液滴パーセルの分布とともに、空気過剰率が 3.4 の領域を空気

過剰率の等値面で示す。最初、シリンダ中央領域で形成された混合気はシリンダ壁に向かって広がり、燃焼室体積の減少に伴ってシリンダ全体を満たす。

ソリッドコーン噴霧のサイド噴射の場合は、ホローコーン噴霧の中央噴射の場合より、混合気形成過程に、噴霧同士の衝突効果によって蒸発率が著しくなり、図 4 に示すようにある程度の H. I. の増加が認められる。

4. 結論

予混合圧縮着火機関における均一な混合気を形成するためのピントルノズルによる噴射条件の組み合わせとしては、早期噴射、小さい初期液滴粒径及び小さい噴霧角度が有効であることが明らかになった。また、噴霧同士の衝突を利用するホールノズルのサイド噴射方式が圧縮行程末に均一化の高い希薄な混合気の形成に有効であることを確認した。

参考文献

1. 武田, 中込, 新村, 日本機械学会論文集 B 編, 第 62 巻, 第 599 号, 1996, pp. 347-354
2. Wakisaka, T., et al., Proceedings of the Second International Workshop on Advanced Spray Combustion, IWASC9823, pp.273-, 1998
3. Miyamoto, T., et al., SAE Paper 1999-01-0229, 1999

Fig. 1 Process of mixture formation by hollow cone spray (a)droplet parcels, (b) velocity fields and (c) fuel vapor mass fraction

Fig. 2 Effect of (a)injection timing, (b) initial droplet size (SMD), (c)spray cone angle and (d) injection velocity on the H.I.

Fig. 3 Mixture formation processes, Iso-value surface of air excess ratio to $\lambda=3.4$, (a)Hollow cone spray, central injection (b)Solid cone spray, side injection

Fig. 4 Effect of nozzle type and injection position / direction on the H.I.