衝突拡散方式機関の衝突部が 空気流動におよぼす影響*

田 辺 秀 明**

木 許 慎一郎***

加 藤 聡****

Effects of Impinging Part on Air Movement in Combustion Chamber
of Impinging Diffusion Direct Injection Engine.

By Hideaki Tanabe, Shinichiro Kimoto, Satoshi Kato

The effects of the spray impinging part on the in-cylinder air flow were numerically analyzed in the combustion chamber of the impinging diffusion direct injection diesel engine using KIVA-3 code. KIVA-3 code was enhanced to cater the impinging part as an internal obstacle by adopting the virtual droplet method, which is relatively easy to implement.

Numerical result shows that the turbulence generation is promoted by the impinging part and is transformed by the squish flow into the piston cavity. The secondary flow is generated beneath the impinging part as well. The secondary flow area increases as the distance between top surface of the impinging part and bottom surface of the cylinder cover increases.

1. はじめに

ディーゼル機関の排気低減・燃料消費率低減の一方法として、OSKA機関があげられる。これまでに筆者らは^{1,2)}、単気筒ディーゼル機関にOSKA方式を適用して、その排気特性及び燃料消費特性などを明らかにして来た。また、非定常気体噴流及びディーゼル噴霧によるOSKA機関の混合気形成過程の解明を行って来た。

OSKA機関では、燃料は図1に示すように噴射弁(5)から衝突部(4)に衝突して、水平方向に円盤状に分散する。この燃料噴霧は、噴霧上下面から空気を導入するので、通常の壁面衝突噴霧と比較しても空気導入量が大で貫通性が弱い。このため、燃焼室側壁への噴霧衝突が減少し、壁面での噴霧

(1) Dimple (4) Impinging Part
(2) Upper Piston (5) Nozzle
(3) Lower Piston (6) Notch

図1 OSKA機関

* 原稿受付 平成13年11月27日

** 正 会 員 群馬大学(群馬県前橋市荒牧町4-2)

*** 群馬大学(当時)(群馬県前橋市荒牧町4-2)

**** 正 会 員 金沢工業大学石川県石川郡野々木町扇が丘7-1)

火炎のクエンチングにより生じるSOFやTHCなどの未燃成分の排出が減少する。また、空気導入増大による効果として、ススなども減少する。

OSKA機関においては、衝突部の寸法、形状、取り付け位置などが排気及び性能特性に大きな影響を及ぼす。一例として、シリンダヘッド下面と衝突部上面との距離 L_{imp} を変化させた場合の排気特性及び燃料消費率の実験結果を図2に示す。

図の実験において、衝突部を L_{imp} が○印の2.5mmから3.5mm(◇)、4.5mm(△)、5.5mm(□)となるように1mm刻みで下方に移動すると、スモーク、CO、THCなどの未燃成分排出濃度が最小となる噴射時期が遅角側に移動することがわかる。また、それらの最小値も L_{imp} により異なる。図においては、 $L_{imp}=3.5$ mmの時がもっとも最適噴射時期に

おける未燃成分の排出濃度が低く、燃料消費率も低い値となっている。

このように、OSKA機関においては衝突部の位置、寸法、形状などが性能・排気特性に大きな影響を及ぼすが、OSKA機関の最適化を行なうにあたって通常の直接噴射式ディーゼル機関における最適化パラメータに加えて衝突部に関するパラメータが増えることを意味する。このことは、OSKA機関の最適化実験工数の増大の原因となっており、数値シミュレーションの併用による実験工数の低減が必要とされる。

また、実験により最適化を行なうにあたっては、それぞれのパラメータによる燃焼・排気・性能へ及ぼす機構が解明されている方が、効率的な実験が行える。しかしながら、OSKA機関における衝突部による影響の機構解明はほとんど行なわれていないのが実状である。

このような衝突部による影響の原因として、衝突部が燃焼室内空気流動に及ぼす影響が考えられる。燃焼室内空気流動の解明には、数値シミュレーションは有効な方法である。内燃機関の燃焼室内空気流動シミュレーションプログラムの代表例としてKIVA^{3,4,5)}が上げられる。KIVAは多くの内燃機関関連の研究機関で用いられており、報告例も多い。しかしながら、KIVAの標準状態では、本研究の対象である衝突部のような内部障害物を含んだ燃焼室内空気流動の解析は行えない。

筆者らは、衝突部を仮想粒子の集団で表し、仮想粒子-空気間での

図2 衝突部位置 L_{imp} を変化させた場合の排気および燃料消費率sfc特性の一例
(機関回転数 $N_e=2,200$ rpm, 正味平均有効圧力BMEP=0.394MPa, 衝突部直径 $D_{imp}=8$ mm, ピストンキャビティー入口径 $D_L=23$ mm, ピストンキャビティー入口径 $D_{nt}=5$ mm)

運動量交換により衝突部による空気流動を表わすという、仮想粒子法⁶⁾をKIVA-3³⁾に適用して、衝突部が燃焼室内空気流動に及ぼす影響を明らかにしたので、ここに報告する。

2. 計算方法および条件

計算は、筆者らの実験²⁾で用いたボア93mmストローク92mmのOSKA機関を対象に、KIVA-3を用いて軸対称座標系で行った。

KIVA-3では本研究の対象とする障害物のような内部障害物の取扱いは困難である。内部障害物を扱えるようにするオーソドックスな方法としては、KIVA-3内の境界条件を扱う部分を書き換えるということが考えられる。

しかしながら、衝突部はピストンが下方に有る時はスキッシュエリアに存在し、ピストンの上昇に伴ってピストンキャビティー内に位置し、その後再びピストンの下降によりキャビティー内からスキッシュエリアに移動する移動境界である。さらに、KIVA-3ではスキッシュエリアは伸縮座標系、ピストンキャビティー内は非伸縮座標系である。このような系での境界条件の扱いは複雑であり、FORTRANのソースコードで約2万行のKIVA-3の中で、このように複雑な境界条件が扱えるように誤りなく書き換えることは非常に困難である。

そこで、衝突部に相当する部分に静止した仮想粒子を配置することにより等価的に衝突部を表現するという仮想粒子法を用いることとした。本方法では、仮想粒子を配置するサブルーチンを新たに付け加える他は、KIVA-3への変更はほとんど必要がない。

仮想粒子法の概念は、次のように考えられる。

仮想粒子が含まれる演算セル内の質量保存に関しては、仮想粒子の体積の増加による空気の体積減少が生じる。このため、仮想液滴を密に配置した場合にはそれが含まれる演算セルには空気の流入が減少する。

この噴霧液滴の体積増加に伴う空気体積減少は、KIVA-3内蔵の質量保存ルーチンにより自動的に処理される。

運動量保存に関しては、空気の有する運動量と仮想粒子との運動量の交換が行われ、その結果空

気の流速が減少する。KIVA-3においては、空気と液滴との運動量交換は抗力の式を介して液滴に運動量が与えられ、演算セル内の運動量が保存されるよう空気の流速が定められる。

このようにして、仮想粒子を配置することによって仮想粒子が配置された演算セル内の空気の流速は減少する。仮想粒子の密度を気体の密度よりも十分大きくとり、数密度および直径を大きくすることによって、演算セル内の空気流速は無視出来る程度に小さくなる。これによって、流体力学的には衝突部が存在する場合とほぼ等価な条件を得ることができる。

計算に際しては、衝突部直径 $D_{imp}=10\text{mm}$ 高さ $h_{imp}=7\text{mm}$ の円錐形とし、シリンダヘッド下面から衝突部上面までの距離 L_{imp} を変化させた。慣性項の差分には、QSOU⁴⁾ (Quasi Second Order Upwind Differentiation: 擬似二次風上差分) を、乱流モデルには、 $k-\epsilon$ モデルを用いた。また、実機での条件にあわせて無スワールとし、機関回転数2200rpmの条件で計算を行った。なお、今回は衝突部による燃焼室内空気流動への影響を調べるのが目的であるので、燃料噴射は行わない条件とした。

3. 計算結果

衝突部形状を円錐形とし、シリンダヘッド下面からの距離 L_{imp} を2.5mmとした場合の流速ベクトルを図3に示す。また、比較のため衝突部が存在しない場合の結果を図4に示す。

衝突部が存在しない場合、ピストンの上昇に伴ってスキッシュエリアの空気がピストンキャビティー内に流入することに、単一押し込み渦流が生じる。

衝突部を設けた場合には、スキッシュエリアの空気はピストンの上昇に伴いピストンキャビティーに流入する。流入初期には、空気は衝突部円錐に沿って流入する。さらにピストンが上昇すると、流れは円錐部から剥離を開始する。それに伴い、衝突部下方には二次渦が生じる。二次渦の領域は、時間の経過に伴い徐々に増加するが、円錐部直径以下の領域に収まる。

衝突部を設けるとピストンキャビティー入り口面積が減少するので、キャビティー入り口での軸方向流速 w が増大する。しかしながら、ピストン

14.8° BTDC, $U_{\max}=37\text{m/s}$, $W_{\max}=38\text{m/s}$

9.8° BTDC, $U_{\max}=40\text{m/s}$, $W_{\max}=42\text{m/s}$

5.8° BTDC, $U_{\max}=32\text{m/s}$, $W_{\max}=41\text{m/s}$

TDC, $U_{\max}=26\text{m/s}$, $W_{\max}=38\text{m/s}$

図3 流速分布
(円錐形衝突部, $L_{\text{imp}}=2.5\text{mm}$)

14.8° BTDC, $U_{\max}=34\text{m/s}$, $W_{\max}=39\text{m/s}$

10.0° BTDC, $U_{\max}=42\text{m/s}$, $W_{\max}=44\text{m/s}$

5.0° BTDC, $U_{\max}=39\text{m/s}$, $W_{\max}=44\text{m/s}$

0.3° ATDC, $U_{\max}=40\text{m/s}$, $W_{\max}=43\text{m/s}$

図4 流速分布
(突起部無し)

キャビティー内での流速の最大値は衝突部の有無の影響をさほど受けない。

乱れエネルギーに関しては、図5に示すように、衝突部を設けた場合、流入初期には衝突部上の平面と円錐との境界に高乱れ領域が存在する。この高乱れ場は、時間の経過に伴い下方に移送され、ピストンキャビティー底面方向へ移動する。この高乱れ場は、二次渦領域のみでなく押し込み渦流

の主流（以下主渦と称す）領域にまたがって位置する。

この衝突部により生じた乱れのエネルギーは、ピストンキャビティー入り口に生じる乱れエネルギーよりも高い。

これらのことより、衝突部には乱れ生成の機能も有ることがわかる。

図3と同一の L_{imp} で、円筒形の衝突部を用いた場

図5 乱れエネルギー k の分布
(円錐形衝突部, $L_{\text{imp}}=2.5\text{mm}$)

図6 流速分布
(円筒形衝突部, $L_{\text{imp}}=2.5\text{mm}$)

合の計算結果を図6に示す。スキッシュエリアからの流入は円筒部側壁に沿って生じるが、円筒部直下の部分にはほとんど流入せず、円錐の場合と比較して早い時期からの二次渦の発生が観察される。また、二次渦領域の範囲も円筒直径より広い領域にまで広がっている。

図3の条件から2mm下方の $L_{\text{imp}}=5.5\text{mm}$ に衝突部を設けた場合の流速ベクトル分布を図7に示す。

図3との比較より、衝突部を下に設置すると、円錐部からの剥離が早まり、また二次渦領域が拡大していることがわかる。二次渦の流れの方向が主渦と逆であることも明らかに示されている。

OSKA機関では、噴射後の燃料はスキッシュ流により下方に移送され、シリンダ軸近傍に燃料過濃領域が生じ、噴射時期が遅くなると酸素不足での燃焼が行われる²⁾。この燃料過濃領域が衝突部下方

図7 流速分布
(円錐形衝突部、 $L_{\text{imp}}=5.5\text{mm}$)

の二次渦領域に取り込まれた場合には酸素不足の状態が生じたススが二次渦内を循環し再酸化が妨げられることが考えられる。これが、図2に例を示したOSKA機関で衝突部を下方に設置した場合のスス濃度増加の一因であると考えられる。

4. 結論

OSKA機関に於いて衝突部が空気流動に及ぼす影響を調べる目的で、障害物を仮想粒子の配置で表現するという簡易な方法でKIVA-3の拡張を行った。その結果、次のようなことが得られた。

1. スキッシュによりピストンキャビティー内にトロイダル渦が生じるが、衝突部を設けることにより衝突部下方にトロイダル渦と逆方向に回転する二次渦が生成される。
2. スキッシュ流がピストンキャビティーに流入する際に、衝突部の角で乱れが生成する。これによる乱れの強さは、キャビティー入り口のリップにより生じる乱れよりも大きい。
3. 衝突部を下方に設置すると、二次渦の発生が早まりその領域も大きくなる。

文献

- 1) Tanabe H., Sato G.T., Kato S., Onishi S., Impinging Diffusion Direct Injection Diesel Engine, *21st CIMAC*, D14, 1995, pp.1-13
- 2) Kato S., Tanabe H., Sato G.T., Fujita K., Development of a Direct Injection Diesel Engine with Mixture Formation by Fuel Spray Impingement, *FISTA 2000*, F2000A098, 2000, pp.1-7
- 3) Amsden A.A., Ramshaw J.D., O'Rourke, P.J., Dukowicz J.K., O'Rourke P.J., KIVA: A Computer Program for Two- and Three-Dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel Sprays, *LosAlamos National Laboratory Report LA-10245-MS*, 1985.
- 4) Amsden A.A., O'Rourke, P.J., Butler T.D., O'Rourke P.J., KIVA-II: A Computer Program for Chemical Reactive Flows with Sprays, *LosAlamos National Laboratory Report LA-11560-MS*, 1989.
- 5) Amsden A.A., KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries, *LosAlamos National Laboratory Report LA-12503-MS*, 1993.
- 6) O'Rourke, P.J., Amsden A.A., Three Dimensional Numerical Simulation of the UPS-291 Stratified Charge Engines, *SAE Trans.* 870597, 1987

質疑応答

~~~~~メッセージ~~~~~

質問(小川英之 北海道大学)

衝突部下部の気流が弱く、そこに過濃混合気的形成されずが発生する原因であるとされておりますが、OSKAの噴霧のイメージから衝突部下部にはあまり噴霧が侵入せず、過濃混合気を形成しないようにも思われますが、いかがでしょうか。

回答

OSKA噴霧の性質として、貫通性が弱いことが挙げられる。また、空気導入率が高いために液滴の蒸発も促進されるものと考えられる。このため、スキッシュなどの空気流動により噴霧が曲げられやすく、燃料液滴および燃料蒸気も空気流動により運ばれやすいものと考えられる。これによって、燃料液滴・蒸気が衝突部下方に流入するものと考えられる。

田辺 秀明

加藤 聡

ディーゼル機関の燃料と排気に取り組んで来て、昨今のディーゼル排気に対する世間の風当たりの強さに大変興味があります。もともと出たくて出しているわけではありませんが、ディーゼル機関の作動原理上でも有害式分生成は必要条件では当然ないわけですから、減らしましょうよ、と言いたいのですが、さて具体策はとなると？

かなり困難な課題で、不可能に近いという見解もあるようですが、その分、楽しみも多そうだなと考えている昨近です。