CFD による高スキッシュ燃焼室内高乱流
ディーゼル燃焼の解析*木戸口 善行^{*1}, 楊 長 林^{*2}, 三 輪 恵^{*3}Analysis of High Turbulence Combustion in a Direct-Injection
Diesel Engine with High Squish Combustion ChamberYoshiyuki KIDOGUCHI^{*4}, Changlin YANG and Kei MIWA^{*4} The University of Tokushima, Dept. of Ecosystem Engineering,
2-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8506 Japan

Simultaneous reduction of NO_x and particulate emissions in a direct-injection diesel engine has been realized experimentally with a high squish combustion chamber. The purpose of this study is to investigate the effects of high squish combustion chamber on combustion process in detail. Engine CFD code FREC was used for the analysis. The results show the followings. (1) Compared with standard toroidal chamber, high squish chamber generates high turbulence due to strong squish and large expansion flow is caused in the cavity. (2) Rich and high turbulence combustion, which forms ring area in the cavity under squish lip, continues during the combustion. (3) The high squish combustion chamber keeps fuel long in the cavity and less fuel spreads out to the cold clearance volume. (4) For the condition of retarded injection timing, the effect of high squish is mainly observed at initial combustion and high swirl is more effective at diffusion combustion.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Emission, Computational Fluid Dynamics, Combustion Chamber, Turbulence

1. は じ め に

ディーゼル機関は燃料経済性に優れ、CO₂ 排出量が少ないことから地球温暖化抑制の点でも有利である。しかし、ディーゼル機関から排出される NO_x および黒煙が環境汚染の一因となっており、これらの低減が緊急かつ重要な課題になっている。

ディーゼル機関における NO_x と黒煙の排出にはトレードオフの関係があり、NO_x の低減には燃焼の抑制、黒煙の低減には燃焼の促進という相反する対応が要求される。これらの要求を満たすものとして二段燃焼法が提案されている⁽¹⁾。これは、燃焼初期に燃料過濃として NO_x 抑制を図り、燃焼後期に急速燃焼を行って黒煙の低減を行う方法で、著者ら⁽²⁾ は直接噴射式機関において二段燃焼を実現するため高スキッシュ形ピストン副室方式を採用して、燃焼室内での局所過濃燃焼ならびに強いスキッシュとスワールを利用した急速燃焼を行って NO_x と黒煙の同時低減の可能性を示した。

このように、燃焼室形状によって燃焼形態ならびに有害排気物の生成傾向が大きく変化することが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。このような実験結果に対して、燃焼室形状の影響を詳細に理解するには、実験と並行して燃焼室形状の効果をシミュレーション計算などを用いて解析することが有効であると考え、KIVA-II⁽⁵⁾ に代表される CFD 計算コードは、温度や混合気濃度などの空間分布がわかるため有力な解析手段となるが、実験結果と関係づけたものではシリンダ内圧力、熱発生率を実測と比較したものが多く、混合気分布などの詳細な解析は予測のみにとどまっている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

本研究では CFD 計算を燃焼解析に利用し、高スキッシュ燃焼室によって生じるスワールおよびスキッシュの複合流が乱れ、温度、混合気分布などに及ぼす影響について調べ、さらに、実機関の NO_x および微粒子の排出傾向と高速度写真でとらえた燃焼形態との対比により、高スキッシュ燃焼室が燃焼に及ぼす効果について考察する。計算プログラムには池上ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾ の FREC コードを使用し、着火の記述には可変遅れ機構⁽¹⁰⁾ を取り入れた。

2. 計算方法および計算条件

計算は円筒座標 (r, θ, z) を使い、4 噴孔ノズルであ

* 原稿受付 1998 年 11 月 26 日。

^{*1} 正員、徳島大学工学部(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)。^{*2} 学生員、徳島大学大学院。^{*3} 正員、徳島大学大学院工学研究科。

E-mail: kidog@me.tokushima-u.ac.jp

Fig. 1 Computational grid

ることから図1のような1/4円筒の領域について計算を行い、周期境界条件を適用した。基礎式は連続の式、運動量保存式、単位質量あたりの乱れエネルギー k 、乱れエネルギー消散率 ε 、比エンタルピー h 、化学種濃度などに関する保存式から成り立っている。

燃焼モデルは、まず燃料と酸素の予混合気形成され、これが化学反応によって消費されるとして扱う。混合気の形成は、燃料塊と酸素塊が乱れによって微視的に混合するとし、Magnussenら⁽¹¹⁾の渦崩壊モデルと同様に単位時間単位容積あたりの混合気形成速度 R_m を

$$R_m = (1+S)A_m \frac{\rho\varepsilon}{k} \min\left(m_{fu}, \frac{m_{ox}}{S}\right) \dots\dots(1)$$

により求める。ここで、 m_{fu} , m_{ox} はそれぞれ燃料および酸素の質量分率、 S は理論酸素量、 ρ は密度、 A_m は定数で $A_m=4$ である⁽⁸⁾。形成された予混合気の単位時間単位容積あたりの消費速度 R_f は、アレニウス形非可逆一段反応を仮定し、

$$R_f = \frac{S}{1+S} \frac{\rho^2 m_{mi}^2}{M_{O_2}} F_f \exp(-D_f/T) \dots\dots(2)$$

とする。ここに、 m_{mi} は予混合気質量分率、 M_{O_2} は酸素の分子量、 T は温度、 F_f , D_f は定数で $F_f=10^{10}$, $D_f=12\,000\text{ K}$ を採用した⁽¹²⁾。こうすると、正味の混合気形成速度は $R_m - R_f$ となり、燃焼初期は低温のため R_f が小さく予混合気が蓄積し、高温になると R_m と R_f が釣り合って全体の反応速度が R_m で決まるようになる。実際の燃焼でも、着火遅れ期間中は混合気が蓄積され、着火後に可燃混合気が一気に燃えることからこの仮定は合理的である。しかし、計算では着火遅れが短く初期燃焼が小さくなって燃焼過程を十分予測できないため、本研究では可変遅れ機構に基づく着火条件を取り入れ、初期燃焼の経過をより正しく表現できるように改めた。これは、混合気の一部で燃焼が開始すると、圧力、温度が上昇し、他の部分の着火遅れが短くなっていくとするものである。着火条件として池上ら⁽¹³⁾は、混合気が着火に至る過程では化学種が増殖し、その濃度があるしきい値を超えたとき急激な熱発生が始まるとしている。これにならない、活性

Table 1 Computational conditions

Run No.		1	2	3	4
Combustion Chamber	—	Toroidal	High squish	←	←
Compression Ratio	—	17	←	19.5	←
Top Clearance	mm	1.56	2.42	1.56	←
Swirl Ratio	—	2.2	←	←	3.1
Injection Timing	° ATDC	0	←	←	←
Injection Duration	° CA	18	←	←	←
Load	MPa	0.7	←	←	←
Experimental	NOx ppm	500	535	550	480
Data ⁽²⁾	Smoke BSU	1.8	1.6	1.6	0.97

Fig. 2 Combustion chamber geometry

化学種生成速度 s を計算セル内の燃料モル濃度 $[F]$ と酸素モル濃度 $[O]$ および平均ガス温度 T により、

$$s = A[F]^B[O]^C \exp(-D/T) \dots\dots(3)$$

で与え、 s の積分値が1を超えたときに着火するとした。ここで、 A, B, C, D は定数で、 $B=0.3, C=1.2, D=9\,300$ であり⁽¹³⁾、頻度因子 A の値は、着火遅れならびに初期熱発生率の経過が実測と合うように変更し、表1に示す計算水準のNo.1~4でそれぞれ1.1, 3.0, 1.8, 2.0とした。

噴霧モデルは、既存コードと同じく、噴霧を運動量理論⁽¹⁴⁾に基づく準定常気体噴流と扱い、噴霧経路途中の吸込領域で周囲空気のエントレイン量を計算し、着火位置に配置したわき出し領域で可燃混合気のわき出しがあるとする。

対象とした機関は、シリンダ径102 mm、行程105 mmの四サイクル直接噴射式ディーゼル機関(ヤンマーNFD170)⁽²⁾で、図2に示す二つの燃焼室について計算を行った。燃焼室は標準トロイダル形燃焼室と高スキッシュ燃焼室とした。高スキッシュ燃焼室は強いスキッシュを発生させるため、ピストン直径 D に対する燃焼室入口口径 d の比 d/D をトロイダル形の55.6%に対し35%とし、燃焼室内で燃料過濃条件をつくるため燃焼室容積を小さくした。計算条件は、実機関の運転条件と同じとし、機関回転速度が1800 rpmで、噴射ノズルは噴孔径0.29 mmの4噴孔ノズル(YDLLA-P)、燃料噴射時期はTDC、噴射期間は18°CAである。燃料には軽油(密度835 kg/m³、低位発熱量45 500 kJ/kg)を用い、当量比0.66の高負荷条

件である。表1に解析を行った水準における計算条件と実機関でのエミッション測定結果を示す。水準1, 2は圧縮比 $\varepsilon=17$ 一定で燃焼室形状のみが異なり、水準3は高スキッシュ燃焼室の水準2に対し上死点すきま δ をトロイダル形燃焼室と同一になるように $\varepsilon=19.5$ にしてスキッシュを強くしたものの、水準4はさらにスワール比 r_s を2.2から3.1まで大きくしたものである。実測では噴射時期をTDCまで遅延させた場合、トロイダル形燃焼室では排気煙の悪化が避けられないが、高スキッシュ燃焼室の $\varepsilon=19.5$ ではスワール、スキッシュを強くすることで排気煙が改善されることに加え、 NO_x 排出量も低くなっている。

Fig. 3 Comparison of cylinder pressure and heat release rate

Fig. 4 Comparison of gas velocity, turbulent intensity, temperature and fuel mass fraction between two combustion chambers

3. 計算結果および考察

3・1 熱発生率の経過 図3は図2に示す2種類の燃焼室について計算したシリンダ内圧力 p 、熱発生率 q のクランク角 θ に対する経過を実測とともに示す。熱発生率をみると、いずれの燃焼室でも着火遅れ期間後の初期燃焼により熱発生率のピークが $\theta = 10^\circ\text{ATDC}$ 前後に現れる。燃焼室による違いをみると、高スキッシュ燃焼室で着火遅れが短く、熱発生率および圧力の立上りがはやく、計算では燃焼後半の圧力がやや低くなっているが、これは拡散燃焼における圧力上昇が小さいためであり、拡散燃焼のモデルをさらに検討する必要がある。計算と実測で圧力や熱発生率の経過が定性的に合致しており、熱発生率の最大値や立上り時期も実測とほぼ同程度の値を示していることから、計算結果は実機関の燃焼経過をおおむね記述できているといえる。

3・2 ガス流動状況の比較 燃焼室形状による燃焼経過の違いを調べるため、ガス流動状況を比較した。図4は水準1, 2について、二つの燃焼室のもとで初期燃焼期の 10°ATDC および拡散燃焼期の 20°ATDC における水平方向断面のガス速度 $u_{r\theta}$ 、噴霧軸を含む軸方向断面のガス速度 u_{rz} 、乱れ強度 u' 、温度 T 、未燃燃料の質量分率 m_{fu} の分布を示す。 $u_{r\theta}$ 、 u_{rz} および u' の図より、高スキッシュ燃焼室では逆スキッシュが強く燃焼後半でも強い乱れが発生することがわかる。また、凹み内外周での燃焼による膨張流が強く、右巻きの二次渦やスワールもかなり増速されている。このため、高温部領域は凹み内底部から中央にかけて広く分布し、未燃燃料は凹み内外周から下方に広がっている。これに対し、トロイダル形燃焼室では 20°ATDC になると二次渦がなくなり、高温の燃焼ガスが凹み内の上部に達して低温のすきま部への流出がみられる。また、未燃燃料も凹み内上部に多く残りこのまま隙間部へ流出する。高スキッシュ燃焼室では、凹み内外周の高温高濃度の燃焼ガスが逆スキッシュに乗って隙間部へ直接流出するのをスキッシュリップによって抑えられ、燃焼が凹み内外周で進展しながら混合気がいったん凹み内中央へ移動したのち隙間部へ燃焼ガスとして流出する燃焼形態をとることがわかる。このように、高スキッシュ燃焼室では高温の燃焼ガスが長く燃焼室内に残り、また未燃燃料の凹み内底部への広がりが大きく、隙間部への流出が少ないため排気煙低減をもたらしたものと考えられる。

3・3 スワール、スキッシュの効果 次に高スキッシュ燃焼室での燃焼改善のため、上死点隙間を小さく

Fig. 5 Gas velocity, turbulent intensity, temperature and fuel mass fraction for strong squish condition

くすることによるスキッシュの強化とスワール比の増加による混合促進の効果を調べた。図5は上死点隙間 δ を 2.42 mm から 1.56 mm に小さくした水準3の場合について u_{rz} 、 u' 、 T 、 m_{fu} の分布を示す。図4(b)の $\delta = 2.42$ に対し δ を小さくすると、スキッシュが強くなりクランク角 10°ATDC において燃焼室入口付近の乱れが大きくなる。このため燃焼が活発になり、凹み外周にある燃料濃度の高い領域が狭くなっている。ただし、 20°ATDC 以降になるとスワールに比べてスキッシュが小さくなるため、スキッシュの強弱による乱れ、温度および燃料濃度の各分布の違いが小さくなる。このことから、スキッシュ強化による乱れは上死点後の燃焼初期に混合気形成や燃焼促進に対して効果があると考えられる。図6はスワール比 r_s が 2.2 と 3.1 の場合の 30°ATDC における各分布を比較している。図6より高スワールにした場合、 30°ATDC まで強い乱れが燃焼後期まで持続し、凹み内の未燃燃料がかなり減少する。これはスワールにより凹み内の急速燃焼が促進されているためと考えられる。図7は高スキッシュ燃焼室でスキッシュ、スワールを強化したときの凹み内の未燃燃料量と噴射量の比 M_{fb} のクランク角 θ に対する変化を示す。図7より、スキッシュ

Fig. 6 Gas velocity, turbulent intensity, temperature and fuel mass fraction for different swirl condition

Fig. 7 Variations of unburned fuel in the cavity and clearance volume for different squish and swirl conditions

を強くした $\delta=1.56$ の場合は、 $\delta=2.42$ に比べて TDC から 10°ATDC 付近までの初期燃焼期に未燃燃料が大幅に減少し、スワールを強くした $r_s=3.1$ の場合は、初期燃焼期に加えて 20°ATDC 以降の拡散燃焼後期に未燃燃料の低減が図られていることがわかる。これは、図 5 および図 6 で解析した燃焼過程におけるスワール、スキッシュの効果に対応した結果になって

Fig. 8 Variations of unburned fuel and products for the two chambers

いる。したがって、噴射時期を TDC まで遅延させた場合は、初期燃焼期に高スキッシュ燃焼室によるスキッシュ強化で燃焼室内の乱れが増加し、拡散燃焼期にスワール増加により混合が促進されるため燃焼が活発になり、排気煙が低減するといえる。

3・4 高スキッシュ燃焼室の効果 トロイダル形燃焼室と高スキッシュ燃焼室の燃焼の違いを明らかにするため、水準 1 (トロイダル形燃焼室) と高スキッシュ燃焼室の最良水準である水準 4 の計算結果を比較した。図 8 は凹み内および隙間部の未燃燃料量と噴射量の比 M_{fb} , M_{fc} 、同じく燃焼生成物の量と噴射量の比 M_{pb} , M_{pc} の時間変化を示している。図 8 によると、噴射終了までの燃焼初期に高スキッシュ燃焼室では燃焼室形状によるスキッシュの強化とスワールの増加により燃焼が促進されるため、凹み内の未燃燃料がトロイダル形燃焼室より少なくなり燃焼生成物が増えている。拡散燃焼後半になると、トロイダル形燃焼室では凹み内の未燃燃料が急激に減少するが、これは低温の隙間部へ流出する未燃燃料が多くなるためであり、これが排気煙の低減を難しくしていると考えられる。高スキッシュ燃焼室では強い逆スキッシュによってトロイダル形燃焼室より多くの既燃ガスが隙間部へ流出しているが、未燃燃料は凹み内に多く残っており、隙間部へ流出する未燃燃料の量が少ない。このことから、高スキッシュ燃焼室では燃料の多くが凹み内で燃焼したのち隙間部へ流出することになり、排気煙の低減に

Fig. 9 Relations between fuel mass fraction and temperature for the two combustion chambers

効果があるといえる。図9は凹み内の全格子点における温度 T と燃料質量分率 m_{fu} の関係を示したものである。10°ATDCにおいて、トロイダル形燃焼室では低温で高い燃料濃度の部分があることがわかるが、これは凹み内外周上部に位置しておりスキッシュが弱いいため燃料と空気の混合が不十分で燃焼が緩慢な様子があらわれている。しかし、 NO_x 生成が盛んであると考えられる10°ATDCから20°ATDCにかけて、2500 K以上の高温になっている格子数が両燃焼室でほぼ同じであることから、実測において NO_x 生成量が同等になっていることが説明できる。30°ATDCになると、トロイダル形燃焼室では先に述べたように、未燃燃料の多くが隙間部へ流出するため高濃度の格子数が少なくなるが、高スキッシュ燃焼室では高温かつ高濃度の領域が存在していることがわかる。図10に示す高スキッシュ燃焼室における各水平断面 J_{18} , J_{23} , J_{26} の温度および燃料分布によれば、この高温高濃度の領域はスキッシュリップ下方の凹み内外周部にリング状に分布している。このことから、高スキッシュ燃焼室では、凹み内外周で過濃燃焼が拡散燃焼後半まで持続していると考えられる。

以上の解析をもとに、実機関の高速度燃焼写真を撮影し、二つの燃焼室での燃焼形態を調べた。図11は機関回転速度1500 rpm、平均有効圧力 $P_e = 0.5$ MPaの高負荷条件で、水準1(トロイダル形燃焼室)および水準4(高スキッシュ燃焼室)の条件での燃焼をエンドスコープにより撮影したものである⁽²⁾。図11によると、トロイダル形燃焼室では16°ATDCで凹み内に輝炎がみられる。22°ATDCになると輝炎が凹みの外へ吹出し、画面全体が明るい火炎でおおわれる。その後、28°ATDCになると、輝炎は温度の低い隙間部で多く

Fig. 10 Temperature and fuel distribution for high squish chamber at 30°ATDC

みられる。これは、トロイダル形燃焼室では未燃燃料を含む燃焼ガスが早い時期に凹み上部に達し、隙間部へ流出するという計算結果と一致する。計算より、このとき多くの未燃燃料も同時に隙間部へ流出していると考えられ、排気煙悪化の要因になっている。これに対し高スキッシュ燃焼室では、着火時期がトロイダル形燃焼室より早く、着火後は火炎が強いスワールによって旋回しながら燃焼しており、22°ATDCまで燃焼室中央の突起が観察される。これは、輝炎が拡散燃焼後半まで凹み内外周のリップ下方にあり、計算結果からもこの領域で過濃燃焼が行われていることを示している。そして、計算結果と同様に拡散燃焼後半の28°ATDCになって輝炎が隙間部へ勢よく吹出し、短時間で見えなくなる。このように、火炎観察からも高スキッシュ燃焼室では凹み内で十分燃焼が行われた後、既燃ガスが隙間部へ流出していることが示されている。

このような高スキッシュ燃焼室の燃焼形態を模式す

Fig. 11 Endoscopic view of flame behavior for the two combustion chambers

Fig. 12 Image of high turbulence combustion in the high squish combustion chamber

ると図12のようになっていると考えられる。図12は高スキッシュ燃焼室の燃焼形態を一つの混合気の塊に注目して模式的に表したもので、混合気が凹み内に流入したのち火炎がピストン頂面へ流出する様子を燃焼前から燃焼後期にいたる時期で示している。燃焼開始までは、上死点付近で生じる強いスキッシュとスワールの複合流のため可燃混合気が燃焼室内でかく乱される。この複合流は、強いスキッシュによって形成される軸方向の二次渦がスワールに乗って凹み内外周を旋回する形態をとり、これが燃焼により加速される。流速の計算値によるとこの旋回渦は燃焼期間中に凹み内を3回転以上旋回する。さらに、強いスワールによる遠心力が働くため、燃焼時には燃焼室中心へ向かう膨張流が強くなる。凹み中央の突起による効果と強い軸方向の二次渦のため、燃焼ガスの一部は再び凹み内外周の火炎帯に取り込まれる。こうして、燃焼ガスを含む均一で過濃な未燃混合気がスワールによってリップ下方の外周部を旋回しながら過濃燃焼を行い、十分に燃焼し終えたのち逆スキッシュにより隙間部へ既燃ガスが流出するものと思われる。

4. ま と め

直接噴射式ディーゼル機関において高スキッシュ燃

焼室における燃焼をCFD計算により解析し、実機関の排気ガスの実測値および高速度燃焼写真と比較した結果、次のことが示された。

(1) 高スキッシュ燃焼室にすると、強い乱れを発生することができ、燃焼に伴う膨張流が大きくなって燃焼ガスが凹み内に広がり、凹み内での燃焼が主体になる。

(2) 高スキッシュ燃焼室では、燃焼期間中スキッシュリップ下方の凹み内外周部でリング状に均一過濃燃焼が持続し、未燃燃料の隙間部への流出が少ない。

(3) 噴射時期遅延時には、高スキッシュの効果が初期燃焼にみられ、さらにスワールを強くすると拡散燃焼が促進される。

(4) CFD計算による燃焼予測と実機関の排気ガス測定および燃焼観察結果を関連付けることができ、CFD計算を燃焼解析に適用することが可能になった。

終わりに、本研究に協力いただいた当時本学学生(現：アイメックス) 小栗正成君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Konno, M., Chikahisa, T. and Murayama, T., *SAE Paper*, No. 932797 (1993).
- (2) Yang, C., Kidoguchi, Y. and Miwa, K., *Proc. COMODIA 98*, (1998), 63-68.
- (3) 大聖泰弘・斎藤孟・池谷信之, 機論, **52**-479, B(1986), 2768-2773.
- (4) 植田隆広・張 瓏・藤野竜介・濱口孝一, 自技論, **28**-1 (1997), 35-40.
- (5) Amsden, A. A., Ramshaw, J. D., O'Rourke, P. J. and Dukowicz, J. K., *Los Alamos Nat. Labo. Rep.*, LA-11560-MS, (1989).
- (6) Kong, S. C., Han, Z. and Reitz, R. D., *SAE Paper*, No. 950278 (1995).
- (7) Belardini, P., Bertoli, C., Corcione, F. E., Giacomo, N. D. and Police, G., *Proc. COMODIA 90*, (1990), 529-537.

- (8) Ishiguro, J., Kidoguchi, Y. and Ikegami, M., *JSME Int. J.*, Ser. II, **31**-1(1988), 158-165.
 - (9) 池上詢・飛田正俊・石黒淳一, 自技論, No. 42(1989), 33-37.
 - (10) 池上詢・三輪恵, 機論, **40**-334(1974), 1717-1729.
 - (11) Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1976), 719-727.
 - (12) Edelman, R. B. and Harsha, P. T., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **4**(1978), 1-62.
 - (13) 池上詢・中谷好一郎・塩路昌宏, 第 34 回燃焼シンポジウム論文集, (1996), 286-288.
 - (14) 和栗雄太郎・藤井勝・網谷竜夫・恒屋礼二郎, 機論, **25**-156(1959), 820-826.
-