4 弁中央副室付ディーゼルエンジンの副室形状の最適化*

清田 雄彦^{*1}, 桑原 一成^{*1}, 竹村 純^{*1}Optimized Subchamber for 4-Valve Center-Subchamber Diesel Engine^{*2}

Yuhiko KIYOTA, Kazunari KUWAHARA and Jun TAKEMURA

^{*2} Mitsubishi Motors Corporation, 1 Nakashinkiri, Hashime, Okazaki-shi, Aichi, 444-8501 Japan

A 4-valve center-located-subchamber diesel engine brings efficient use of the air because of the symmetric propagation of jets out of the subchamber into the mainchamber, but also a negative tendency toward a high level of smoke emission because of the small-volume subchamber. Analyses of indicators in the sub- and the main-chambers showed that a pin set at a down and peripheral part of the fuel spray in the subchamber, is an effective way of reducing the smoke emission, as a result from suppressed heat release in the subchamber. Visualization with a subchamber model showed that the pin acts on controlling flows and flame propagation in the subchamber, rather than as a heat spot for ignition. This finding suggests that a subchamber without the pin can reduce the smoke emission, when its shape is optimized for the same kind of flow and combustion control as that with the pin. A successful example of a subchamber without the pin was proposed.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Combustion Products, IDI Diesel Engine, 4-Valve Engine, Smoke, Indicator Analysis

1. 緒 言

高出力化をねらった IDI ディーゼルエンジンの 4 弁化は、副室をシリンダすなわち主室の中央部に直立させて配置することになり、副室から主室への噴流の伝播を均等に行うことができるため、主室の空気利用率を高めることができる。また、噴流伝播距離が短くなり噴流速度を抑えることができるため、噴孔径の拡大によって絞り損失を低減することができる。さらに、副室でリッチ燃焼、主室でリーン燃焼を行わせるため NO_x の排出レベルが低いという IDI ディーゼルの本質的な特長を持ち合わせる。一方、4 弁中央副室化にともない、副室が動弁系に取囲まれるレイアウト上の制約によって副室容積を大きくとることができなくなるため、小容積の副室で過度にリッチな燃焼が行われ、スモークが生成し易いという課題が浮上する。

IDI ディーゼルのスモーク低減に対して、大別して以下の 2 つの燃焼制御のアプローチが考えられる。

(1) 副室容積を大きくとり、副室で大部分の燃料を燃焼させる。

(2) 副室容積を小さくし、副室を燃料、空気、火

炎の混合物の噴射弁として利用し、主室の燃焼を活性化させる。

4 弁 IDI ディーゼルの場合、副室容積を大きくできない制約によって、(2) のアプローチに従い課題の解決に取り組むことが求められる。

一方、4 弁 IDI ディーゼルの燃焼改善策として、副室にピンを付加する方法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。ピンを噴霧中心軸上に設置し、ピン形状を、流動、噴霧衝突、混合気形成の制御を意図して最適化することによって、大幅なスモーク低減を実現している。しかし、ピンが意図した役割を果たしているかどうかは必ずしも明らかにされていない。

本研究では、はじめに、4 弁 IDI ディーゼルのスモーク低減のための燃焼制御のポイントを明らかにするため、副室形状、ピンの有無、ピンの設置位置と形状を変えた条件で副室と主室の指圧解析を行い、スモーク排出量と燃焼特性の関係を整理する。また、副室モデルの中の可視化を行い、ピンが燃焼制御に果たす役割に検討を加える。最後に、より簡素な方法として、燃焼制御のポイントを踏まえた副室形状の最適化によって、ピンを用いることなく、効果的なスモーク低減を実現することができることを示す。

* 原稿受付 2001 年 6 月 25 日。

^{*1} 正員、三菱自動車工業(☎ 444-8501 岡崎市橋目町字中新切 1)。

E-mail: takemura-jun@pde.mitsubishi-motors.co.jp

2. 実機試験と可視化の方法

2.1 供試エンジンと運転条件 ポア×ストローク 91.1×95 mm, 気筒当りの行程容積 619 cm³, 圧縮比 19.7 の4気筒4弁副室付エンジンであり, 図1に示すように, 副室と主室の容積比 45:55 の副室をシリンドラすなわち主室の中央部に直立させて配置した. 副室容積をこれ以上小さくすると, スモーク排出量が急増した. 表1に副室の主要諸元を示す. 副室頂部に, 噴霧角 10° の単噴孔燃料噴射ノズルを傾斜角 5.5° で設置した.

図2に, 副室形状, 副室に付加したボール付ピンの形状, 顕著なスモーク低減効果が得られたピン設置位置を示す. 先に結果を述べてしまうと, ピンを噴霧下

Fig.1 4-valve center-subchamber diesel engine

Table 1 Subchamber specifications

Volume ratio	45%
Hole area ratio	1.2%
Throat diameter	φ10
Number of holes	8
Hole angle	165°
Spray angle	10°

流部, ピン外周がノズル中心軸に接する位置に設置した場合に, 顕著な効果が得られた. ストレート型副室の場合は, 副室に流入しピンの左右に分岐する流れに非対称性を与えることを意図して, ピン下部に図示した切欠きを付加することによって, 顕著な効果が得られた.

エンジン回転速度 2000 min⁻¹, EGR 無, 燃料噴射圧 23 MPa, 噴射時期 4 CADBTDC (Crank Angle Degrees before the Top Dead Center) として, 燃料噴射量を変えて空気過剰率を 2.6, 2.1, 1.6, 1.25 と変えた (過給圧は 65~80 kPa と変化した) 条件で, 指圧計測と, スモークメータ (バンザイ社製, DSM-20AN) を用いたスモーク排出量の計測を行った. また, 正味平均有効圧 0.4 MPa として EGR 率を 0~30 % と変えた条件で, NO_x 排出量と PM 排出量の計測を行った. このとき, PM メータ (AVL 社製, AVL482) を用いた.

2.2 指圧解析方法 IDI エンジンの場合, 副室と主室の間で噴孔を通した作動ガスの移動が起こるため, 単一燃焼室のように密閉系のエネルギー式を用いて指圧解析を行うことができない. 主室と副室の指圧計測を同時に行い, 各々の室について状態式とエネルギー式を, 室間の流れについて連続の式と流量式を適用して, 各室の熱発生率を求めた^{(4),(5)}.

各室の内部エネルギーの変化は, 流入あるいは流出するガスの全エネルギーと各々に加えられた熱量の和に等しいと考え, 両室間の圧力差から噴孔を通過する流

Fig.2 Different subchambers with or without pin

量を求めた.

$$dG = f\{(P_m - P_s), Ca, f\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

次に各々の室におけるエネルギー式を用いて熱発生率を求めた.

$$dQ_s = d(G_s C_v T_s) - C_p T_m dG \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$dQ_m = d(G_m C_v T_m) + P_m dV_m + C_p T_m dG \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, Q : 熱量, G : ガス質量, T : 温度, P : 圧力, V : 燃焼室容積, C_p : 定圧比熱, C_v : 定容比熱, Ca : 噴孔流量係数, f : 噴孔全断面積, 添字 s, m はそれぞれ副室, 主室の状態量を示す. 尚, 行程容積で除することによる圧力換算で熱量を取り扱った.

2.3 可視化方法 シリンダ中央に配置した副室の可視化は, 副室が動弁系に取囲まれるレイアウト上, 困難である. このため, 図3に示すように, 単筒エンジンのシリンダ側部に, 実機副室容積部の垂直中心断面とおおむね同じ断面形状で2次元形状の容積部を持つ副室モデルを設置し, 容積部の可視化を行うことによって, 実機副室内の現象を推測した. 実機副室に設置したピンの温度は非常に高くなることから, ピンをボール付グロープラグに置換することによって高温のピンを模擬した. 設置のために連絡通路部の延長が必要であったことと2次元形状化のため, 容積が増大し, 圧縮比が16.7に低下したが, 給気を160℃に加熱することによって着火遅れを短縮した.

エンジン回転速度 1000 min⁻¹, 無過給, EGR 無, 燃料噴射圧 23 MPa, 噴射時期 10 CAD BTDC, 空気過剰率 2.5 として, 副室条件の差異が, 指圧解析結果に実機の場合と同様の傾向にある差異をもたらすことを確認した後, 高速度ビデオカメラ (コダック社製, KODAK HS4540) を用いて撮影速度 13500 fps で可視化を行った. レーザシート法によって流動を, 透過光減衰法によって噴霧挙動を, 直接撮影によって火炎挙動を観測した. レーザシート法のトレーサ粒子として, 平均粒径 40 μm, 真比重 0.04 g/cm³ のポリマーマイクロバルーンを用いた.

3. 実機試験結果と考察

3.1 スモーク排出特性 図4に, それぞれの副室でピン無の場合, ピン有の場合のスモーク排出特性を示す. いずれの副室も, ピン無の場合に負荷域全域で多量のスモークが排出されるが, ピンを適切な位置, すなわちピン外周がノズル中心軸に接するように設置

Fig.3 2-dimensional subchamber for visualization

することによって, 効果的なスモーク低減を実現できる. ピンによるスモーク低減効果はコメット型副室の場合に顕著であり, 空気過剰率 2 以上の低負荷域でスモーク排出量をほぼゼロにすることができる.

図5に, ストレート型副室でピンの設置位置と形状を変えた場合のスモーク排出特性を示す. ピンをノズル中心軸上に移動させた場合は, ピン外周が噴霧中心軸に接するように設置した場合と比べて, 高負荷域でスモーク低減効果が見られるが, 低負荷域ではこの効果はほとんど見られない. 一方, ピン下部に切欠きを付加した場合, 顕著なスモーク低減効果を得ることができ, スモーク排出特性はコメット型副室でピン有

Fig.4 Effect of pin on smoke levels

Fig.5 Effect of pin position and shape on smoke levels

Fig.6 Heat release profiles in sub and main-chambers (λ : 1.6)

の場合に近づく。

以上の結果は、ピンのスモーク低減に果たす役割が、噴霧が高温のピンに衝突することによる気化や着火の促進だけでなく、流動の制御を通じた燃焼制御でもあることを示唆する。

3.2 スモーク排出量と燃焼特性の関係 図6に、それぞれの副室でピン無の場合、ピンによって顕著なスモーク低減効果が得られた場合の指圧解析結果を示す。いずれの副室もピン有の場合は、ピン無の場合に比べて、着火遅れが短くなるとともに、副室の熱発生が抑えられる。一方、主室の燃焼は活性化される。副室の熱発生の上立ち上がりから主室の熱発生の上立ち上がりまでの時間に着目すると、いずれの副室もピン有の場合のほうが短い。例えば、ストレート型副室でピン無の場合、副室の熱発生が始まってから2CAD後に主室の熱発生が始まるが、ピン有の場合、副室の熱発生が始まるのとはほとんど同時に主室の熱発生が始まるように見える。これは、着火時期を基準とすると、ピン有の場合のほうが早期に火炎が副室から主室に噴出し始めることを示唆する。

図7は、負荷を変えた条件のデータをまとめて、副室の熱発生量とスモーク排出量の関係として示した

Fig.7 Relationship between subchamber heat release and smoke levels

ものである。異なる負荷のデータのプロットであるが、負荷の変化にともなうこれらの値の変化の傾向として、プロットを結ぶ曲線も示した。ピン有の場合は、ピン無の場合に比べて、副室の熱発生量は少なく、スモーク排出量も少ない。全てのデータを通じて、副室の熱発生が抑えられるほどスモーク排出量が少なくなる傾向にある。

一般的には、副室の熱発生が抑えられると、火炎が副室から主室に噴出し始める時期は遅くなるであろ

うから、副室の熱発生を抑えることと、副室の火炎と燃料を多量の空気が存在する主室に早期に噴出させることを両立させることに、スモーク低減のための燃焼制御のポイントがある、と考えられる。

4. 可視化結果と考察

4.1 流動 図8に、ストレート型副室の場合の流れ場の構造を示す。ピン無の場合、流れ場は副室中央部を貫通する強い流れによって支配され、この流れが噴霧と対向する状況となる。切欠き付ピンを適切な位置に設置した場合、副室に流入しピンの左右に分岐する流れの非対称性によって、流れ場の渦構造が時間的、空間的に大きく変動しながら、次第に流れ場に旋回成分が与えられていく。ピン無の場合のような噴霧に対向する流れは見られない。コメット型副室の場合、流れ場は強い旋回流によって支配される。トレーサ粒子が副室周辺部に集中してしまうため、ピンの有無による流れ場の構造の差異をとらえることはできなかったが、旋回流のピン背後の部分に差異が生ずるのは明白である。

4.2 噴霧と火炎の挙動 図9に、それぞれの副室の場合の噴霧形状と火炎挙動を示す。ストレート型副室でピン無の場合、副室中央部の流れと噴霧が対向する状況で、噴霧貫徹部への空気導入が促進されると考えられる。噴霧貫徹部で着火が起こり、火炎は噴霧

の上流部と下流部に成長する。ストレート型副室で切欠き付ピンを設置した場合、流れの噴霧貫徹部への影響は見られないが、ピン近傍で着火が起こった後、火炎は噴霧上流部へではなく、ピンの左右に分岐する流れに沿って成長する。

コメット型副室でピン無の場合、噴霧は旋回流に沿って流され、噴霧への空気導入、旋回流旋回方向への燃料分散が促進される。火炎は、噴霧上流部とともに、旋回流旋回方向に成長し、副室周辺部に火炎の循環が形成される。コメット型副室でピン有の場合、噴霧が旋回流に沿って流される状況はピン無の場合と同様であるが、ピンによって、火炎が旋回流旋回方向に成長するのが抑えられ、一方、火炎の副室容積部中心部への成長が見られる。この場合、ピン設置位置はノズル中心軸上であるが、この条件でも効果的なスモーク低減を実現することができることを確認した。

いずれの副室もピン有の場合は、火炎が副室上部に成長するのが抑えられる。この傾向と上述のスモーク排出量と燃焼特性の関係を合わせて考えると、火炎を副室容積部下部に留めておくことによって、新たな

Fig.8 Flow field structures in straight-type subchamber

Fig.9 Sprays and flames in subchambers

燃料が直接火炎の中に噴射されるのを防ぐことに加え、火炎を副室から主室に早期に噴出させることが、ピンによるスモーク低減の機構であることが導かれる。すなわち、ピンによるスモーク低減効果は、ピンがヒートスポットとして作用するだけでなく、流動の制御を通じて燃料の分散、火炎挙動を制御する役割を果たすことに起因する。

5. 副室形状の最適化によるスモーク低減

5.1 副室形状 以上の結果と考察によれば、ピンを用いなくても、副室形状の最適化によって、ピンを適切な位置に設置した場合に類似の流動制御を実現

Fig.10 Optimized subchamber

Fig.11 Smoke levels of optimized subchamber

Fig.12 Heat release profile in optimized subchamber (λ : 1.6)

することができれば、大幅なスモーク低減効果を引き出すことができると考えられる。

図 10 は、顕著なスモーク低減効果を示した副室形状の一例である。連絡通路部が、直立する下部と、傾斜角 20° で偏向する上部によって構成される。容積部の形状に特に工夫は無い。ポテンシャル的な安定性を考えれば、通路部の流れは、通路部の軸線に沿うのではなく、直進する流れに近づこうとしてできるだけ大きな曲率を持って流れると推測される。この流れは、容積部中心から適度に偏心して容積部に流入し、適度な強度の旋回流を形成する。

5.2 スモーク排出特性 図 11 に、この副室を用いた場合のスモーク排出特性を示す。ピンによるスモーク低減効果が顕著な場合と同等のスモーク低減効果を得ることができる。図 12 に、この副室を用いた場合の指圧解析結果を示す。ピンによるスモーク低減効果が顕著な場合と同様に、副室の熱発生が抑えられ、主室の燃焼が活性化される。この結果は、前述のスモーク低減のための燃焼制御のポイントに整合する。

図 13 に、通路部と容積部の連結部のエッジの鋭さ

Fig.13 Effect of corner shape on smoke levels

Fig.14 Negative effect of pin on smoke levels in optimized subchamber

を変えた場合のスモーク排出特性を示す。エッジを鋭くするほどスモーク低減効果が大きくなる。この結果は、この副室によるスモーク低減効果に、旋回流強度の制御だけでなく、エッジによる乱れの生成も関与することを示唆する。

図 14 に、コメット型副室でピンによるスモーク低減効果が顕著な場合と同位置にピンを設置した場合のスモーク排出特性を示す。例外的にスモーク排出量が増大する。この結果は、ピンによるスモーク低減効果が、ピンがヒートスポットとして作用することだけに起因しないことを確信させる。

図 11 によれば、この副室の場合のスモーク排出特性は、ストレート型副室でピン有の場合よりも、コメット型副室でピン有の場合に類似する。この結果に加え、NOx 排出量と PM 排出量のトレードオフの関係に着目して、この副室による流動制御とピンによる流動制御の類似性に検討を加える。図 15 に、この副室の場合の関係を、ピンによるスモーク低減の効果が顕著な場合と比較する。この副室の場合の関係はコメット型副室でピン有の場合に類似する。これらの結果は、この副室の場合の流れ場は旋回流によって支配され、この副室によって、コメット型副室でピン有の場合に類似の流動制御が実現されることを示唆するのではない。トレードオフの関係は、旋回流を利用した流動制御によって改善される。

6. 結 言

4 弁 IDI ディーゼルエンジンのスモーク低減策として副室にピンを付加する方法を取り上げ、副室と主室の指圧解析、副室モデルの中の可視化を行うことによって、スモーク排出量と燃焼特性の関係、スモーク低減のための燃焼制御のポイントに検討を加えた。スモーク低減効果に、副室の局所形状や局所温度がおよぼす影響、流動の主流成分と乱れ成分のそれぞれがおよぼす影響など不明な点を残したが、以下の知見を得ることができた。

(1) スモーク低減のためには、副室の熱発生を抑え、主室の燃焼を活性化することが効果的である。こ

Fig.15 Trade-off relationship between PM and NOx levels (BMEP: 0.4MPa)

のとき、副室の熱発生を抑える一方で、副室から主室への火炎の噴出を早期に開始させることが燃焼制御のポイントである可能性がある。

(2) ピンがスモーク低減に果たす役割は、ピンが、ヒートスポットとして作用するだけでなく、流動の制御を通じて燃料の分散、火炎挙動を制御することにある。すなわち、火炎を副室容積部下部に留めておき副室から主室に早期に噴出させることにある。この知見は、ピンを付加した場合に類似の流動制御をねらった副室形状の最適化によって、ピンを用いることなく、効果的なスモーク低減効果を実現することができることを意味する。

文 献

- (1) Thoma, F. and Fausten, H., SAE Paper, No. 932875 (1993)
- (2) Fortnagel, M., Moser, P. and Pütz, W., MTZ 54 (1993)
- (3) Conrad, U. Feucht, H.-J., Klingmann, R. and Krause, R., MTZ 54 (1993)
- (4) 徐, 機論 (第2部), 31-225 (1965)
- (5) 松井, 自技論, Vol. 25, No. 4 (1994)