ピストン位相を考慮したパイロット噴射によるディーゼル燃焼の改善*

李 辰 宇^{*1}, 酒 井 厚^{*2}
小 川 英 之^{*1}, 宮 本 登^{*1}Improvements of Diesel Combustion with Pilot and Main Injections
at Different Piston PositionsChen yu LI, Atsushi SAKAI,
Hideyuki OGAWA^{*3} and Noboru MIYAMOTO^{*3} Hokkaido University, Division of Mechanical Science,
N13, W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628 Japan

The fuel spray distribution in a DI diesel engine with a pilot injection was actively controlled by pilot and main fuel injections at different piston positions to avoid the main fuel injection from hitting the pilot flame. A CFD analysis demonstrated that the movement of the piston with a cavity divided by a central lip along the center of the sidewall effectively separated the cores of the pilot and main fuel sprays. The experiments showed that more smoke was emitted with pilot injection in an ordinary cavity without the central lip while smokeless and low NO_x operation was realized with pilot injection in a cavity divided by a central lip even at heavy loads where ordinary operation without pilot injection emitted smoke so much. The indicated specific energy consumption ISEC was a little bit higher with the pilot injection, mainly because of the reduction in the degree of constant volume combustion. With the advanced pilot injection, ISEC was improved more than that with the retarded pilot injection while the NO_x is a little higher than the retarded pilot injection maintaining still much lower than in ordinary operation.

Key Words: Diesel Engine, Combustion Chamber, Engine Performance/Emission, NO_x , Smoke, Pilot Injection

1. まえがき

ディーゼル燃焼における NO_x 低減対策の一つとしてパイロット噴射が挙げられる⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾. この方法では燃料の二段噴射による第一期燃焼抑制によって NO_x および機関騒音の低減が可能であるが、一般に黒煙が増加する傾向があるため、両者のトレードオフ関係を大幅に改善することが困難とされて来た. その原因の一つとして、パイロット噴霧あるいはその火炎内に多くの主噴霧が進入することに伴う高温過濃領域の形成が考えられる.

本研究では、燃焼室形状の改良とピストン位相を考慮した二段噴射とを行うことにより、パイロット噴霧あるいはその火炎内への主噴霧の進入を極力避けて、黒煙と NO_x の同時低減を図ることを目的とした. 具体的には、図1に示すようにトロイダル燃焼室の側壁中段にリップを設けると共に、ピストン位相を考慮した二段噴射を行うことにより、各噴霧をキャビティの上下に分配することを試みた. すなわち、まず上死点付近での噴射よりパイロット噴霧がキャビティ下部に、次にピストン位置が若干下降した 20°CA ATDC 付近での主噴射で主噴霧がキャビティ上部にそれぞれ分かれて入るような燃焼室形状を考案し、その燃焼の特性と機構を解明した.

2. 実験装置および方法

供試機関は、水冷・単気筒・四サイクル直接噴射式ディーゼル機関(日産ディーゼル PE-6, ボア×ストローク $\phi 133 \times 140 \text{ mm}$)であり、コモンレール噴射システムにより任意の時期および割合の二段噴射が可能である. 実験では、冠部が交換可能なピストンを使用し、図2に示す様な3種類のキャビティを試作して実験に供した. 各燃焼室はいずれも圧縮比が18であり、(a)は通常のトロイダル形、(b)はパイロット噴霧火炎への主噴霧の進入を極力避けるためキャビティ中段にリップを設けた上下分割

(a) Pilot injection at TDC

(b) Main injection at 20°CA ATDC

Fig. 1 Imaged distribution of two-stage injected fuel sprays at different piston positions

* 原稿受付 1999年10月20日.

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目).^{*2} 日産自動車 (〒207-0013 大和市向原4-4-10).

E-mail: h-ogawa@eng.hokudai.ac.jp

形, (c)はその上下分割形にスキッシュリップを追加したものである。燃料噴射ノズルは噴孔径 0.34 mm の四孔ノズルを用い, 噴霧間角度はトロイダル形で 142° , 上下分割形で 110° である。パイロット噴射時期は, パイロット噴霧を極力燃焼室下部に分布させるため, その噴射期間の中央時期が上死点となるように設定したほか, 燃焼早期化のため -20°CA ATDC に設定してパイロット噴霧を燃焼室上部に分布させた場合についても検討した。機関運転条件は, 燃料噴射圧力 120 MPa, 回転速度 1200 rpm, 冷却水入り口温度 80°C , スワール比 2.2 の定常運転を原則とした。

3. CFD による噴霧分布解析

パイロット噴射による燃焼室内の噴霧および混合気濃度分布を CFD コード「FIRE」で解析した。解析対象の燃焼室は, 図 2 に示した通常のトロイダル形 (a) と上下分割形 (b) である。計算では燃料物性を軽油の値とし, 総括空気過剰率を 1.8, 全燃料噴射量に占めるパイロット噴射割合 Φ_{pilot} を 20% とした。

図 3 に, パイロット噴射開始から主噴射の終了後までの非燃焼時の燃料噴霧と当量比分布の推移を示す。図中の○は液滴を表わし, その大小は粒径に比例している。

両燃焼室とも上死点近傍でのパイロット噴射によって側壁からキャビティ底部にかけて混合気が形成されて行くが, パイロット噴射終了の約 2°CA ATDC では, トロイダル形の場合, キャビティ底部全域に比較的広く混合気が分布するのに対し, 中段リップによる上下分割形では大半の液滴及び混合気がリップ下部キャビティに向けて形成されて行くと同時に, リップ上部にも小規模な混合気がわずかに形成される。パイロット火炎はこれらの混合気域を中心に生ずるものが考えられる。

主噴射が開始されると, 上下分割形ではリップによってキャビティ底部への主噴霧進入がかなり抑制され, 大半の噴霧がわずかなパイロット燃料あるいはその燃焼火炎と豊富な新気とが存在すると考えられるリップ上方部に分散するのに対し, トロイダル形では主噴霧がパイロット燃料あるいはその火炎が存在する低酸素・高温部に広く分散するのが明らかである。以上の様に, 上下分割形においてはキャビティ側壁中段のリップとピスト

ン位相とによってパイロット噴霧と主噴霧とがキャビティ燃焼室の上下に比較的良好に分配されるものと考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 燃焼室形状による影響 図 4 に, 図 2 の各燃焼室における, 全噴射燃料に対するパイロット噴射割合 Φ_{pilot} が NO_x , 黒煙, および図示熱消費率 ISEC に及ぼす影響を示す。この場合, NO_x 低減の点から主燃料を遅延噴射させ, パイロット噴射期間および主噴射期間の中央時期をそれぞれ TDC, 20°CA ATDC とした。

NO_x については燃焼室形状による大きな差異は認められないが, いずれの場合も Φ_{pilot} の減少と共に顕著に減少しており, Φ_{pilot} が小さい場合には, 100% すなわち上死点での単段噴射に比べて $1/3$ 程度にまで減少するのがわかる。この低下は, 基本的に遅延噴射される主燃料の増大に対応して主燃焼が遅延することに起因するものと思われる。一方, ISEC は, Φ_{pilot} の減少に伴って増加する傾向があり, 全体的には NO_x とのトレードオフ関係が認められるが, 上下分割形ではその増加の程度が極めて小さく, 特に Φ_{pilot} が 60% 以下ではトロイダル形に比べて著しく改善される。この要因として, トロイダル形に比べて上下分割形の場合, Φ_{pilot} が減少しても主噴霧の着火遅れの増加量が少ないこともあり熱発生等の等容度が比較的高く維持されることが考えられる。例えば, Φ_{pilot} が 100% から 25% まで低減した際の等容度の低下は, トロイダル形が 9% に対して上下分割形が 6% と比較的小さくなっている。なお, Φ_{pilot} が過度に小さくなると失火に至るが, 失火限界の Φ_{pilot} は通常のトロイダル形に比べて上下分割形の方が小さい。

黒煙は, 各燃焼室とも単段噴射から Φ_{pilot} の減少に伴って増加した後減少する特性を示すが, 上下分割形のいずれもトロイダル形に比べて Φ_{pilot} が 60% 以下で著しく低下している。したがって, 上下分割形では Φ_{pilot} を小さくすることにより, 黒煙と NO_x の同時大幅低減が可能であることが明らかである。特にスキッシュリップのない上下分割形では Φ_{pilot} が 13~25% と小さい場合に無煙となっていることが注目される。

上下分割形でのスキッシュリップの有無について比

Fig. 2 Combustion chamber configurations for the pilot injection

Fig. 3 Computed distribution of two-stage injected fuel sprays and equivalence ratios at different piston positions

較すると、両者の性能差は大きくないものの、 Φ_{pilot} が小さい場合、スキッシュリップのある場合はない場合に比較して黒煙および ISEC が若干悪化しており、本パイロット燃焼法ではスキッシュリップの効果は見い出せない。

図 5 に、各燃焼室での主噴射開始時期が NOx、黒煙、および ISEC に及ぼす影響を示す。この場合の Φ_{pilot} は、NOx 低減の点から失火限界近くの安定燃焼点とし、トロイダル形では 22 %、スキッシュリップのない上下分割形は 11 %、スキッシュリップ付の上下分割形は 14 % としたが、これらいずれの場合もパイロット噴射はほぼ 2°CA ATDC で終了する。

主噴射時期が例えば 15°CA ATDC よりも早い場合、トロイダル形では黒煙が比較的多く発生するのに対し、上下分割形では黒煙が低く特にスキッシュリップのない場合は無煙でかつ比較的良好な ISEC を確保できるのが明らかである。これは、トロイダル形においてはパイロット火炎内に多量に主噴霧が進入しがちなのに対し、上下分割形では、中段リップの設置によって、パイロットおよび主噴霧がリップの上下に分配されると共に、リップ上部での混合気形成・燃焼が良好に行われた結果と考えられる。

一方、主噴射時期を大きく遅らせると、トロイダル形ではパイロット火炎内への主噴霧進入量の減少及び着火遅れ増加などのため黒煙が減少するに対し、上下分割形では主噴射遅延に伴うリップ上部での混合気形成の悪化により黒煙が増加したと思われる。この場合、いずれの燃焼室でも主噴射遅延による燃焼遅延のため ISEC は悪化する。なお、上下分割形の方が早い主噴射時期で失火を生じるが、これは主に上下分割形での Φ_{pilot} がトロイダル形の半分程度であることに起因するものと言えよう。

上下分割形でスキッシュリップの有無について比較すると、定性的には両者は同一の特性を示すが、スキッシュリップのある場合は主噴射の遅延により失火が容易に生じ、またいずれの主噴射時期でも黒煙および ISEC が若干悪化しており、この場合もスキッシュリップは負の効果を示している。

以上の結果から、本パイロット方式のような主燃料の遅延噴射燃焼では最小のパイロット噴射による主噴射燃料の着火とある程度良好な混合気形成とが確保されるならば、基本的に主燃料の大幅遅延噴射による著しい NOx 低減が得られるとともに、パイロット火炎域を避けた主燃料噴射による混合気の当量比低下、キャビティ上

Fig. 4 Effect of pilot injection ratio, Φ_{pilot} on ISEC, smoke, and NOx for three combustion chambers ($\lambda = 1.8$)

部に分布する主燃料火炎によるスキッシュ部空気の利用促進などによって黒煙改善も同時に得られたものと考えられる。

なお、図6に、図示平均有効圧 IMEP に対する各燃焼室での NOx、黒煙、および ISEC を示す。この場合、パイロット噴射量を図5 と同一にし、主噴射中央時期を常時 20°CA ATDC とした。スキッシュリップのない上下分割形燃焼室の使用により、トロイダル形に比較して広い負荷範囲に亘って NOx を余り増加させることなく、特に高負荷での黒煙と ISEC を良好に保持し得ることがわかる。

4.2 パイロット噴射燃焼と通常のディーゼル燃焼の比較 スキッシュリップのない上下分割形燃焼室でのパイロット噴射燃焼と通常のディーゼル燃焼との比較を行った。この際、通常のディーゼル燃焼での燃料噴射時期は熱効率が最高となる -8°CA ATDC と NOx 低下を考慮した TDC の2通りに設定した。

図7に、総括空気過剰率に対する排気エミッションと ISEC を示す。パイロット噴射燃焼では広い負荷範囲で ISEC が悪化するものの、通常のディーゼル燃焼で黒

Fig. 5 Effect of main injection timings on ISEC, smoke, and NOx for three combustion chambers ($\lambda = 1.8$)

煙が発生し始める $\lambda = 1.8$ においても黒煙は全く発生せず、NOx も通常のディーゼル燃焼で噴射時期を TDC まで遅延させた場合に比較しても全負荷域で低下している。

図8に、通常のディーゼル燃焼とパイロット噴射燃焼において主噴射時期を変えた場合のインジケータ線図および熱発生率を示す。通常のディーゼル燃焼で主燃料の噴射時期を 6°CA ATDC まで遅延させると、着火遅れは増大し、燃焼の大部分が急激な第一期燃焼となっており、NOx 増加の一因を示唆している。一方、パイロット噴射燃焼では、主燃焼が穏やかに進行しており、それと遅延噴射とにより低 NOx が得られたものと考えられるが、燃焼の大部分が 20°CA ATDC 以降でも可能になるため等容度は低下し、ISEC が悪化したものと言える。したがって、本パイロット噴射方式で ISEC を向上させるには、主燃料噴射時期をできる限り前進させること、および膨張行程での空気流動等による燃焼促進を行うこと等が重要となる。

4.3 パイロットおよび主燃料噴射の早期化

上下分割形燃焼室において、パイロットと主噴霧を分離分布させるもう一つの噴射時期として、パイロット噴射

Fig. 6 ISEC, smoke, and NOx for three combustion chamber configurations at varied IMEP

を圧縮行程に、主噴射を上死点付近にそれぞれ設定し、パイロット噴霧をキャビティ上部に、主噴霧をその下部に分配させる圧縮行程パイロット噴射を考える。その場合スキッシュリップのない上下分割形燃焼室 (b) を用い、パイロット噴射を圧縮行程の $-15^{\circ}\text{CA ATDC}$ に設定して燃焼の早期化を試みた。

図 9 に、その際の主噴射時期が ISEC および排気エミッションに及ぼす影響を示す。いずれの場合も ϕ_{pilot} は 11% である。パイロット噴射時期を早期化させた場合、主噴射時期を上死点付近とすることにより、NOx を大きく増加させることなく無煙で ISEC の改善が可能になることがわかる。しかし、主噴射時期を更に前進させてパイロット噴射に近づけると NOx と黒煙は増加する。

図 10 に、圧縮行程パイロット噴射燃焼と通常のディーゼル燃焼における ISEC および排気エミッションを比較する。この場合パイロット噴射量は図 9 と同じ値に保ち、総括空気過剰率は主噴射量で調整した。また、主噴射の中央時期は、パイロット噴射時期が $-15^{\circ}\text{CA ATDC}$ の場合上死点、パイロット噴射が上死点の場合 20°CA ATDC にそれぞれ設定した。圧縮行程パイロット

Fig. 7 Comparison of ISEC, smoke, and NOx for the diesel combustion with pilot injection and ordinary diesel combustion

噴射の場合、ISEC は低空気過剰率域を除いて通常のディーゼル燃焼と同等の良好な値を示し、また空気過剰率が 2.0 以上では無煙運転が実現されている。NOx は、上死点パイロット噴射の場合に比べて若干高くなるものの、通常運転の場合に比較すると負荷全域でかなり低いレベルであることがわかる。一方、THC は圧縮行程パイロット噴射の場合、広い空気過剰率範囲で増加するが、上死点パイロット噴射では通常の運転に同等となっている。また、両パイロット噴射とも条件によっては CO が増加している。

図 11 は、主噴射時期を変化させた際の ISEC と NOx、および黒煙と NOx のトレードオフ関係をそれぞれ示す。空気過剰率 1.8 の高負荷運転では、これら 3 つの運転条件の下での ISEC と NOx のトレードオフ関係はほぼ同一線上を推移しており、パイロット噴射による NOx の低減は基本的に ISEC の悪化を伴うことがわかる。一方、黒煙と NOx のトレードオフ関係は、圧縮行程および上死点のいずれのパイロット噴射によっても大きく改善されるのが明らかである。特に、通常の運転では過度の遅延噴射により NOx が逆に増加する現象、つまり「巻き上がり現

(a) Diesel combustion with pilot injection

(b) Ordinary diesel combustion

Fig. 8 Indicator and ROHR diagrams for diesel combustion with pilot injection and ordinary diesel combustion ($\lambda = 1.8$)

象」を呈するが、特に上死点パイロット噴射では、「巻き上がり現象」が生じにくいことが明らかである。

以上の結果から、上下分割形燃焼室においてはパイロットおよび主噴射の時期を適切に設定することにより、ISECを余り悪化させることなく低 NO_x ・無煙燃焼がある程度可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究の結果を要約すると以下の通りである。

1. キャビティ上下分割形燃焼室においてピストン位相を考慮してパイロット噴射を行うことにより、高負荷での無煙・低 NO_x 燃焼が可能である。この場合パイロット噴射量を極力少なくすることが肝要である。
2. キャビティ上下を分割するリップは、パイロット噴霧火炎への主噴霧の浸入を抑制する上から重要な役割を果たす。
3. 上下分割形燃焼室に更にスキッシュリップを

Fig. 9 Comparison of ISEC, smoke, and NO_x for different pilot injection timings at varied main injection timings. ($\lambda = 1.8$)

設けると黒煙などがむしろ悪化する場合が多く、本実験の範囲ではその効果を見い出せない。

4. パイロット噴射を上死点近傍に、主噴射を膨張行程で行う上死点パイロット噴射では、通常のディーゼル燃焼に比較して図示熱消費率が若干悪化するものの、 NO_x が全負荷範囲で大幅に減少し、通常のディーゼル燃焼で黒煙が発生し始める高負荷においても黒煙は生じない。

5. 上死点パイロット噴射におけるISECの悪化は、燃焼の遅延による等容度の低下によるものである。

6. 燃焼を早期化するためパイロット噴射時期を圧縮行程に、また主噴射時期を上死点近傍にそれぞれ設定することにより、高負荷域を除いて通常のディーゼル燃焼の場合とほぼ同等のISECを得ることが出来る。

7. その場合、上死点パイロット噴射に比べて NO_x は広い負荷範囲で若干増加するものの、通常のディーゼル燃焼に比べると著しく低く、また黒煙もある程度に改善される。

Fig. 10 ISEC for different pilot injection timings at varied excess air ratios.

なお、本研究の一部は、日本機械学会 RC151 研究分科会（主査 藤本 元教授）での研究の一環として行ったものである。

文 献

1. Yokota, H., Kudo, Y., Nakajima, H., Kakegawa, T., Suzuki, T., "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion," SAE Paper 970891, 1997.
2. Takenaka, Y., Kudo, Y., Kakegawa, T., Shiozaki, T., and Aoyagi, Y., "The Spray Models and Their Influence on Ignition," SAE Paper

Fig. 11 NOx-ISEC and NOx-smoke trade-off relationships for pilot injection and ordinary diesel combustions ($\lambda = 1.8$)

950279, 1995.

3. Montgomery, D. T., and Reitz R. D., "Six-Mode Cycle Evaluation of the Effect of EGR and Multiple Injections on Particulate and NOx Emissions from a D.I. Diesel Engine," SAE Paper 960316, 1996.
4. Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G., Reitz, R., "Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-injection in a Diesel Engine", SAE Paper 960633.
5. Badami, M., Trucco, G., and Nuccio, P., "Influence of Injection Pressure of a Di Diesel Engine with a Common Rail Injection System," SAE 1999-01-0193, 1999.
6. Kakinai, A., Yamamoto, A., Sugihara, H., Nakagawa, H., and Shoyama, K., and Uchino, N., "Development of the New K13C Engine with Common-Rail Fuel Injection System," SAE paper 1999-01-0833, 1999.
7. McMillian, M.H., and Gautam, M., "Consideration for Fischer-Tropsch Derived Liquid Fuels as a Fuel Injection Emission Control Parameter," SAE paper 982489, 1998.