直噴式層状燃焼機関における燃焼・排気特性*

首藤 登志夫*¹, 小 川 英 之*¹, 宮 本 登*¹

Combustion and Emissions in DI Stratified-Charge Engine

Toshio SHUDO, Hideyuki OGAWA and Noboru MIYAMOTO

Combustion and exhaust emissions in a DI stratified-charge engine with a large cylinder diameter (135 mm) were examined. In order to obtain a flexible stratified mixture distribution, the fuel was injected in two stages: the first stage was set before the compression stroke to make a uniform premixed mixture and the second stage was at the end of the compression stroke to maintain stable ignition and combustion. The results showed that, compared with homogeneous stoichiometric combustion under rated power operation, 30% SFC and 50% NO_x reduction could be simultaneously achieved with lean stratified-charge combustion. SFC improvement with lean stratified-charge combustion resulted mainly from faster combustion and decreased cooling loss. Optimization for spark timings, secondary fuel injection timings, the proportions of two-stage injection, and the number of nozzle holes were all essential factors for sufficient combustion.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion Products, Thermal Efficiency, Lean Combustion, DISC Engine, Two-Stage Injection, NO_x, HC, Knocking

1. 緒 言

NO_xを中心とした局所的な大気汚染が深刻化していることから、自動車排出ガスに対する規制が大幅に強化され、ディーゼル機関からの有害排出ガスの低減がさらに強く求められている。これに対してディーゼル機関の一部をガソリン機関へ転換することも考えられようが、その場合には熱効率の低下、ノッキング、あるいはシリンダ直径の限界など種々の問題があり、特に大排気量エンジンの転換には困難が生じるものと思われる。

ガソリン機関の高効率化に関する最近の研究としては、縦渦を利用した層状給気⁽¹⁾およびスワールを利用した希薄燃焼⁽²⁾⁽³⁾などがあるが、さらに希薄層状化を目指す手法の一つとして筒内直接噴射が考えられる。この種の筒内噴射式の層状燃焼機関については、古くはテキサコ燃焼方式、また最近では筒内二段噴射によって低負荷時の希薄限界を拡大した例⁽⁴⁾などいくつかの研究がなされてはいるが、広範な運転条件で良好な燃焼を得ることが困難であるため、本格的な実用に

は至っていない。しかし、各種制御技術が進歩した今日、例えば燃料の噴射時期あるいは噴射率などを運転条件に応じて制御することも可能であり、低エミッションで高効率、かつ高出力な機関の実現が考えられる。

本研究では、シリンダ径の比較的大きなエンジンにおいて、筒内への二段燃料噴射方式による高効率・クリーンな層状希薄燃焼の実現を目指し、この方式に関する各種因子と燃費率および排気特性との関連を解明すると同時に、両性能値の大幅な改善を試みた。この場合の二段噴射方式では、早期に一段めの燃料噴射を行うことにより燃焼室全域に希薄な予混合気を形成し、さらに点火直前に点火プラグ近傍へ二段めの燃料噴射を行うことによって超希薄混合気の安定着火と層状燃焼を指向した。

その結果、二段噴射層状燃焼方式を用いることにより希薄域での燃焼安定性、熱効率、および排気エミッションの大幅な改善が同時に可能になることなどが明らかになったので、以下に結果を詳述する。

2. 実験装置および方法

本研究での供試機関は、単気筒四サイクル直噴式ディーゼル機関(ボア φ135 mm, ストローク 130 mm)を

* 平成5年7月14日 第11回内燃機関シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成5年11月22日。

*¹ 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

図1 燃焼室形状および燃料噴射方向

層状燃焼機関に改造したものである。実験に際しては、図1に示すように、シリンダヘッドおよびピストンを改造して圧縮比を9.6に低下させるとともに、ヘッドには点火プラグ、圧力ピックアップ、および燃料噴射ノズルをそれぞれ装着した。またヘッドに装着した1本の燃料噴射ノズルに対して2台のディーゼル噴射ポンプ(ZEXEL PE-P)を接続し、一方を一段め噴射用、他方を二段め噴射用とすることにより、燃料の噴射時期および量を独立に制御できるようにした。燃料噴射ノズルには、ヘッド面からの噴射角 20° 、噴孔挟み角 40° の1, 2, 3, 4噴孔のホールノズル(ZEXEL DLLA-S)を使用した。各燃料噴射方向は図1に示すとおりである。一方、空気流量調節のために吸気管には絞り弁を、また点火用として噴射ポンプ後端にイグナイタをそれぞれ取付けた。

供試燃料としてはJIS規格自動車用1号ガソリン(公表値: 50%留出温度 $T_{50}=85^\circ\text{C}$, RON=100)を用いた。排気中の NO_x およびTHCの測定には、自動車排気ガス測定装置(HORIBA MEXA-2000)を使用した。インジケータ線図は、直流増幅器により増幅した45サイクル分の圧力ピックアップからの出力をA-D変換を介してパーソナルコンピュータフロッピーディスクに記録し、熱発生率および図示仕事等の算出に供した。機関運転条件は、原則として機関回転速度1600 rpm、一段め燃料噴射時期 220°CA BTDC、正味平均有効圧力BMEP=0.61 MPaとした。また燃料噴射ノズルは、噴孔数の影響を調べる場合を除いて2噴孔ノズルを用いた。なお、この条件下での燃料噴射期間は一段め噴射のみによる運転の場合には 25°CA 、二段噴射が20%時には一段め 20°CA 、二段め 5°CA 程度である。

図2 点火時期が排気特性および熱消費率に及ぼす影響

図3 点火時期が圧力経過および熱発生率に及ぼす影響

3. 実験結果および考察

3.1 点火時期の影響 図2に点火時期が層状燃焼時の熱消費率および排気特性に及ぼす影響を示す。この場合、二段め燃料噴射の量は $0.025\text{ cm}^3/\text{cycle}$ (全噴射量の約20%)、時期は -48°CA ATDCである。図2より点火時期 $T_{ig} = -20^\circ\text{CA}$ ATDCにおいて熱消費率は最良となるが、点火時期がこれより進角すると、熱消費率の悪化と同時にTHCが著しく増加する。点火時期の進角に伴うTHCの増加は、二段め噴射による混合気形成が不完全な時点で点火が行われることに起因するものと思われる。

一方、点火時期が -20°CA ATDCから遅延した場合には NO_x が低下しTHCも低く維持されるものの、熱消費率は悪化していく。後者の悪化は、図3の熱発生率にみられるように、主として点火時期の遅延に伴う熱発生率の遅延あるいは等容度の低下によるものと考えられる。

上述の最適点火時期は、空気過剰率および二段め噴射量を変えた予備実験においても認められたことから、以下の実験での点火時期は -20°CA ATDC に設定することとした。

3・2 二段めの燃料噴射時期の影響 図4に機関性能に対する二段めの燃料噴射時期の影響を示す。図4において、二段めの噴射時期が -48°CA ATDC、すなわち点火時期 T_{ig} と二段め噴射時期 T_{i2} の間隔が 28°CA の場合に熱消費率が最も良好となっており、THC も低いことがわかる。二段めの燃料噴射時期の遅延に伴う THC の増加は、前述の点火時期を前進させた場合と同様の理由によるものと考えられる。

図5に二段めの各燃料噴射時期におけるインジケータ線図および熱発生率を示す。図5にみられるように、噴射時期が -48°CA ATDC から -40°CA ATDC に遅延すると燃焼が緩慢かつ長期化し、一方噴射時期

が -48°CA ATDC から -56°CA ATDC に前進すると特に点火直後すなわち燃焼初期での熱発生率が減少している。いずれの場合もこれによる等容度の低下と THC の増加とが相交わって熱消費率の増加が生じたものといえよう。このような、二段め燃料噴射時期の変化に伴う熱発生率の挙動から、点火後の燃焼過程は点火開始時における二段め噴射燃料の混合気濃度あるいは混合気分布の空間的位置あるいは規模に大きく支配されていることが推察される。

以上の結果をもとに、二段めの燃料噴射時期は -48°CA ATDC に設定した。

3・3 ノズル噴孔数による影響 二段噴射時におけるノズル噴孔数と機関性能の関係を図6に示す。2噴孔の場合に熱消費率が最良となっており、それ以上に噴孔数が多い場合には特に THC および熱消費率が增加する。この原因として、多噴孔になるほど点火プラグから離れた噴霧の燃焼が困難になること、および直接点火に寄与する燃料量が減少することなどが考えられる。なおノズル噴孔数が比較的少ない場合の、熱消費率および THC は、均一混合気での値と比較して著しく改善されている。

3・4 二段めの燃料噴射量の影響 図7に、二段めの燃料噴射量と機関性能の関係を、量論混合比および希薄混合比(空気過剰率 $\lambda_0=1.6$)について示す。図7中の λ_{i1} は一段め噴射燃料に対する空気過剰率である。まず希薄混合比において20%程度の二段噴射を行った場合、 NO_x は若干増加するものの、THC および熱消費率は大幅に改善される。特に熱消費率については二段め噴射割合の増加に伴って改善され、その割合が20%で最良値を示すが、そこでの熱消費率は量論混合気の均一予混合燃焼に比べて最大で20%程度改善されている。二段め噴射割合が20%以上に増加すると

図4 二段め噴射時期と排気特性および熱消費率との関係

図5 二段め噴射時期が圧力経過および熱発生率に及ぼす影響

図6 ノズル噴孔数と排気特性および熱消費率との関係

図7 二段め燃料噴射量と排気特性および熱消費率との関係

熱消費率の改善効果は減少していく。この悪化の原因は、主として二段め噴射割合の増加に伴う燃焼期間の増加により等容度が低下することである。また、希薄燃焼時に熱消費率が最良となる二段め噴射割合、つまり約20%に設定した場合、NO_xは最大値を示すが、その値は量論混合気の均一予混合燃焼に比べて40%程度も低くなっている。

一方、量論混合比においても、全噴射量の15~20%の二段め噴射を行うことにより、NO_x濃度と熱消費率とが同時に低減することは注目に値する。

図8は、インジケータ線図および熱発生率を二段噴射の有無について比較した結果である。この場合、二段めの燃料噴射量は0.025 cm³/cycle(全噴射量の約20%)である。図8より、希薄燃焼の場合、均一予混合燃焼に比べて二段噴射では燃焼速度が増加して等容度が向上することがわかる。一方、量論混合比では、二段噴射によって急激な燃焼がむしろ抑制されていることから、NO_x濃度が低減し、また等容度は若干減少するものの、主として冷却損失および機械損失の低減により熱消費率が改善されたものと考えられる。後者については3・6節で詳述する。

3・5 二段噴射燃焼と均一混合気燃焼の比較 二段噴射層状燃焼と均一混合気燃焼とにおいて、全供給燃料の空気過剰率 λ_0 が機関性能に及ぼす影響を図9に示す。低負荷では、二段噴射層状燃焼時の混合気が希薄域へ移行しても燃焼速度はほとんど減少すること

(a) 量論燃焼

(b) 希薄燃焼

図8 均一燃焼および層状燃焼における圧力経過および熱発生率の比較

なく、燃焼の90%終了期間 θ_{90} は量論燃焼時と同程度の値に維持され、二段噴射層状燃焼によって希薄限界が大幅に拡大されることがわかる。この場合、燃焼の希薄化に伴いTHCの悪化が著しく、またNO_xの低下と熱消費率の悪化が若干認められる。

中負荷すなわちBMEP=0.61 MPaでは、均一混合気の場合に比べて、二段噴射を行うことにより特に希薄燃焼域での熱消費率およびTHCが大幅に改善され、またNO_xも $\lambda_0=1.0\sim1.4$ の範囲において著しく低減することがわかる。この場合、均一混合気に対して、二段噴射層状化によって希薄域での燃焼期間の増大もかなり抑えられている。

一方、高負荷では均一混合気に対して二段噴射時には λ_0 の全域にわたって燃焼期間が増加するため二段噴射による熱消費率の改善は微少にとどまるものの、ノック限界が混合気過濃側へ著しく拡大している。また、二段噴射による燃焼の層状化に伴いNO_xおよびTHCは大幅に減少することがわかる。

図 9 空気過剰率 λ_0 が排気および熱消費率に及ぼす影響 図 10 λ_{i1} が排気および熱消費率に及ぼす影響

ここで中負荷運転時に例をとって、一段め噴射燃料量の空気過剰率 λ_{i1} と性能の関係を図 10 に示す。図 10 より均一燃焼に比べて二段噴射にとって特に希薄域が大幅に拡大していることから、希薄混合気の燃焼が著しく促進されること、また同時に希薄化によって熱消費率、THC、および NO_x が改善されていることもあわせて明らかである。さらに、二段噴射層状燃焼における NO_x と熱消費率の改善効果を図 11 にまと

図 11 均一燃焼および層状燃焼における熱消費率と NO_x の関係

めて示す。この場合、均一希薄燃焼においては NO_x が最低となる条件と、熱消費率が最良となる条件の 2 とおりの空気過剰率を選んだ。図 11 より、均一量論燃焼に比べて均一希薄燃焼では、 NO_x が最低となる空気過剰率において NO_x が 60% 程度低下するものの熱消費率の改善は若干にとどまり、一方熱消費率が最良となる空気過剰率において熱消費率は 15% 程度改善されるが NO_x は増加する。これに対して二段噴射層状燃焼では熱消費率 30% 程度、 NO_x 50% 程度的大幅な同時低減が可能であることが明らかである。

3.6 二段噴射が各効率に及ぼす影響 量論燃焼時において二段噴射割合が各効率に及ぼす影響を図 12 に示す。図 12 中の破線は、燃焼効率 η_u を 0.98、比

図 12 二段め燃料噴射割合が各種効率に及ぼす影響

熱比を 1.35 と仮定し、冷却損失割合 ϕ_w 、等容度 η_{gh} 、機械効率 η_m の各効率から計算した正味熱効率 η_e を示す。なお、 η_e はおおむね次のように表される⁽⁵⁾。

$$\eta_e = \eta_u \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{gh} \cdot (1 - \phi_w) \cdot \eta_m$$

図 12 より、二段め噴射割合の増加に伴って等容度は若干減少するものの冷却損失割合の減少と機械効率の増加によって、二段噴射割合 15～20% において熱消費率が改善されることが明らかである。この場合の冷却損失の減少は、基本的にはシリンダ壁面付近の混合気の希薄化に伴う壁面付近での燃焼ガスの温度低下により、また機械効率の増加は、主として二段噴射による急激な燃焼の緩和とそれに伴う燃焼圧力の低下によるものと思われる。

正味熱効率の計算値は実験値に比べて全般に大きいですが、その二段噴射割合に対する両者の傾向はおおむね一致している。計算値が実験値よりも大きいことについては、冷却損失を冷却水の温度変化と流量によって測定しているため実際よりも冷却損失が小さく見積もられているものと考えている。

3.7 各燃焼法における機関性能比較 図 13 に、二段噴射層状燃焼、均一希薄燃焼、および均一量論燃焼の三者についての性能比較を示す。この場合、二段噴射層状燃焼および均一希薄燃焼においては空気過剰率 λ_0 を熱消費率が最良となる値におおのの設定した。均一量論燃焼では BMEP=0.7 MPa、均一希薄燃焼では 0.85 MPa 程度でそれぞれノッキングが生じるため通常の運転が不可能となるのに対し、層状燃焼ではノッキングが回避され最高出力が増加する。他の二者に比べて層状燃焼では、 NO_x が全負荷域で著しく低減し、熱消費率は特に中負荷域において大幅に減少し

図 13 各負荷における熱消費率最良条件下での NO_x および熱消費率

ている。このことから、本供試機関のように特にシリンダ径の大きな機関においては、熱消費率および NO_x の点から、二段噴射層状燃焼が有効であるものといえる。

なお、本研究においてはいずれの運転条件においても排気吐煙はまったく認められなかった。

4. 結 論

本研究において、希薄化、熱消費率、あるいは NO_x に対して二段噴射層状燃焼の有効性がある程度明らかになった。以下に得られた結果を要約する。

(1) 二段燃料噴射によって希薄層状燃焼が可能となり、その効果は中負荷において著しく、量論予混合燃焼に比べて熱消費率 30%、 NO_x 50% 程度の同時低減が可能である。

(2) 二段噴射層状燃焼によって、希薄時には大幅な燃焼促進のため、また量論時では燃焼の緩和にもかかわらず、主として冷却損失の減少と機械効率の増加のため、熱消費率が改善される。

(3) 二段噴射層状燃焼により、低負荷における希薄限界および高負荷におけるノック限界が著しく拡大する。

(4) 最適点火時期において、二段めの燃料噴射時期および燃料噴射割合には、熱効率に対する最適値が存在する。

(5) 燃料噴射ノズルの噴孔数については、熱消費率および THC の点から二孔ノズルが最適である。

本実験の遂行にあたり JR 北海道 武山文明氏、中国東北農業大学 李文哲講師、および松下電器 朔晦誠君の協力を得た。ここに感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 秋篠, 日本機械学会第69期通常総会講演会資料, **D** (1992), 220.
 - (2) 堀江, 日本機械学会第69期通常総会講演会資料, **D** (1992), 223.
 - (3) 中西, 日本機械学会第69期通常総会講演会資料, **D** (1992), 227.
 - (4) 服部・ほか3名, 機論, **59** 557, B(1993), 304.
 - (5) List, H., *Thermodynamik der Verbrennungs Kraftmaschine*, (1939), 71, J. Springer.
-