ディーゼル燃焼に対する燃焼室形状の影響 (高過給四サイクル中速機関による実験結果)*

下津正輝**・下中利康***
須間俊明**** 平田修三****

A Study on the Effects of the Chamber Walls
on the Diesel Combustion Phenomena
(Test Results of Highly Supercharged 4-Cycle
Medium-Speed Diesel Engine)

By Masateru Shimotsu, Toshiyasu Shimonaka,
Toshiaki Suma, Shuzo Hirata

The combustion chamber plays an important role in the fuel-air mixing process and resultant fuel spray pattern which have a large influence in a diesel engine. Furthermore, the chamber wall cools off the gas in the combustion chamber and quenches the combustion zone, thus the thermal efficiency and the combustion efficiency of an engine would be lower.

In order to investigate the effect of the combustion chamber shape on the engine performance, the authors conducted some experiments using a single cylinder 4-cycle test engine and a test equipment. Piston crown shape, combustion chamber height, number of fuel nozzle holes, direction of fuel nozzle hole and charge air pressure were chosen as the experimental factors.

From the results, it is confirmed that the fuel mixing process with surrounding gas is mainly done by the mobility of the fuel spray. Therefore, it was concluded that the interference of the chamber wall in the motion of the fuel spray must be avoided especially on the early stage of the spray travel.

Based on the results, then the authors redesigned the piston crown of their 4-cycle medium-speed diesel commercial engine, and confirmed the improvement of the combustion performance.

1. はじめに

ディーゼル機関の燃焼は、熱効率などの経済的な面や、 NO_x やすすの排出量といった環境面に大きく影響する。その現象は非常に複雑で、それを左右する因子は、燃料系因子や、燃焼室内のガス流動因子など多岐にわたっており、本報で取り上げた燃焼室形状因子は、それらの中で最も重要なものの一つである。その影響としては、まず燃焼室壁は燃料噴霧や周囲気体の運動に干渉して、それらの混合過程そして燃焼過程に影響する。高速ディーゼル機関では、種々の燃焼室形状が実用されており、燃焼性能の改善に寄与している。また燃焼室壁は、燃焼室内気体や燃焼域そのものを冷却することにより、冷却損

失の増大や不完全燃焼物質の排出量の増加をもたらすと考えられる。

このような現象を解明するために、従来から多くの研究成果が報告されている。国吉ら¹⁾、Lustgarten²⁾、常本ら³⁾は、冷間非燃焼状態で燃料噴霧を燃焼室模型内に噴射し、壁面に影響された燃料噴霧の挙動を観察した。そしてその結果から燃料の分散に対する壁面の影響や、壁面での燃料付着について考察を加えている。広安ら⁴⁾、堀ら^{5,6)}は機関実験により燃料噴霧が燃焼室壁に衝突することの混合気形成や着火遅れ、初期燃焼への影響を調べている。長尾、池上ら⁷⁻⁹⁾は種々の形状の燃焼室を実験用機関に適用して高速度撮影により燃焼域の大きさの時間変化などを観察し、それと機関性能の関連を報告している。神本、青柳ら^{10,11)}は、燃焼室形状による燃焼性能や排ガス成分の変化を調べた。しかしこれらの研究のほとんどは小形高速機関に対するものであって、中形機関についてはKawakamiら¹²⁾の報告などわずかである。

そこで著者らは、高過給四サイクル中速機関の燃焼性

* 原稿受付 昭和59年12月1日

昭和59年秋季学術講演(昭和59年10月24日)

** 正会員 三井造船(株)玉野研究所(玉野市玉原3-16-1)

*** 正会員 三井造船(株)玉野事業所(玉野市玉3-1-1)

**** 三井造船(株)玉野事業所(玉野市玉3-1-1)

能の改善を目的として、単気筒機関を用いて、燃焼室形状の変化に伴う機関性能の変化を調べるとともに、常温高圧下の静止気体中に噴射された壁面衝突噴霧に関する実験を行った。実験因子は、ピストン冠の形状、燃焼室の高さ、燃料弁噴孔数、燃料噴射方向角及び給気圧である。これらの実験の結果、機関の燃焼性能を改善する要件である燃料の分散度の改善は、燃料噴霧が有する周囲気体に対する相対運動能力を、できるだけ長期間温存することによって達成されることがわかった。したがって、燃料弁近傍では燃料噴霧の運動速度が大きく、噴霧円錐部からの周囲気体の流入も盛んであるため、燃焼室の高さをある程度確保して、噴霧に対する燃焼室壁の干渉をできるだけ避けたほうが良いと考えられる。以下に詳細を報告する。

2. 供試機関を用いた実験

2.1 実験装置 供試機関の主要目を表1に示す。

この機関は単気筒であるため、過給用に独立の送風系統をそなえている。図1にそれを示す。過給圧は図中の調圧器で所定の値に設定できる。供試機関への送風量は、オリフィスで計測する。本実験の計測項目と、計測方法はつぎのとおりである。

燃焼室内圧は、ピエゾ型圧力ピックアップを使用し、増幅器を経てデスクトップコンピュータで制御される高速データ収録装置により、デジタル化して計測した。燃料噴射圧は、燃料弁と燃料高圧管の連結部に歪ゲージ型圧力センサーを取付け、動歪計、増幅器を経て燃焼室内圧と同時に同様の方法で計測した。これらはいずれも、クランク角度で1度ごとに128サイクル積算し、その平均から1サイクルの圧力パターンを求めた。燃料噴射の開始及び終了の時期は、渦電流型変位計により燃料弁針弁の動きを検出して決定した。排煙濃度は、排気3リットルを濾紙を通過させ、その濾紙の黒さをスモークメータで計測することによりボッシュインデックスとして求めた。

実験に使用した燃焼室の形状は3種類で、ピストンTDC状態での断面形状を図2に示す。3種ともカバー側形状は同じである。1型燃焼室は、ピストン側を円錐台状にしたもの、2型は一つの円形平板状にしたもの、3型は外周に土手を付けて、いわゆる浅皿状にしたものである。図からわかるように、燃料弁近傍での燃焼室高さは、燃焼室容積を同一にすると、1型燃焼室が最小で

図1 送風系統図

図2 供試燃焼室形状

あり、3型燃焼室が最大になっている。これらの燃焼室は、いずれの場合もガス交換過程でピストンと吸排気弁が衝突するのを避けるために、その逃げをピストン側に切り込んでいる。図中の破線は、その切り込みを意味する。図中の角度は、静止状態での供試燃料噴射方向を示す。この図から噴霧円錐角を考慮すると、燃料弁から噴出した燃料噴霧が最も早く燃焼室壁に衝突するのは1型燃焼室の場合であり、最も遠くまで自由に運動できるのは、3型燃焼室の場合であることが想像される。

2.2 実験方法 実験は2段階に分けて行った。まず図2の3種の燃焼室形状と、燃料弁噴孔数、燃料噴射方向角の3個を実験因子とする燃焼性能試験を行った。この実験の実験点数は27点で、各実験点での燃料弁の仕様は表2のとおりである。供試機関の運転条件は、表1に合わせた。また、燃焼室形状ごとに圧縮比が変化するのを避けるために、ピストンTDC時の燃焼室容積が同一になるように、連接棒の長さ(通常1080mm)を調節した。

表1 供試機関主要目

機 関 諸 元		運 転 諸 元	
気 筒 数	1	定格回転数 rpm	530
気 筒 径 ϕ mm	420	燃焼最高圧 ata	131.03 { 12.84 MPa }
ピストン行程 mm	450	平均有効圧 at	20 { 1.96 MPa }
有効圧縮比	11.6	給 気 圧 ata	2.92 { 0.286 MPa }
吸排気弁数	各2	軸 出 力 PS	715 { 526 kW }

表2 燃焼性能試験の燃料弁仕様

1 型燃焼室		2 型燃焼室		3 型燃焼室	
噴射角	噴孔数	噴射角	噴孔数	噴射角	噴孔数
15	8	23	8	23	8
15	9	23	9	23	9
15	10	23	10	23	10
11	8	19	8	19	8
11	9	19	9	19	9
11	10	19	10	19	10
7	8	15	8	15	8
7	9	15	9	15	9
7	10	15	10	15	10

つぎに3型燃焼室を用いて、連接棒の長さを変更することにより、TDC時の燃焼室高さを変化させ、燃焼室高さが燃料噴霧の燃焼にどう影響するかを調べた。

なお、いずれの実験もスワールのない条件で行った。

2.3 実験結果 図3は、表1の条件で、図2の燃焼室形状を用いて、表2の実験表により行った燃焼性能試験の結果の中から、燃料消費率の変化量 ΔB_e と、排煙濃度を示したものである。いずれの性能因子を見ても、実験範囲は、それぞれの燃焼室形状に対する最良点を含んでおり、それは、どの燃焼室形状においても9孔で実現されている。

全体的に見て、1型燃焼室は他の2種の燃焼室に比較して極端に性能が悪い。また、1型燃焼室は他の燃焼室より燃料噴射角に対する燃費性能の変化が大きい。

2型燃焼室と3型燃焼室を比較すると、燃料噴射角15度の場合は機関性能にほとんど差がない。しかし、さらに燃料噴射角がピストンの方を向いた場合、2型燃焼室では燃費性能がどんどん悪くなるのに比べて、3型燃焼室では一旦良くなってから悪くなる傾向が見られ、両燃焼室の間に傾向の相違が見られる。

図4 a, b, c は、3種の燃焼室におけるそれぞれの最

図3 燃焼室形状と機関性能

図4 a 燃料噴射率と熱発生率(1型燃焼室)

図4 b 燃料噴射率と熱発生率(2型燃焼室)

図4 c 燃料噴射率と熱発生率(3型燃焼室)

良燃費性能の場合について燃料噴射率と熱発生率の時間変化をプロットしたものである。1型燃焼室は他の燃焼室に比べて熱発生率が燃焼の初期から低く、後燃えが多い。燃焼の初期から熱発生率が大きいのは3型燃焼室であり、第1期の予混合燃焼期の熱発生率も3型燃焼室が最大値を示す。着火遅れ期間に関しては、いずれの燃焼室においても有為な差は認められなかった。

図5 噴孔数による K_e パターンの変化

本実験に使用した燃料系は、燃料弁の燃料噴射方向角以外全く同一のものを使用したことから燃料噴射率は、3種の燃焼室全部ではほぼ同一の時間変化を示すが、燃料噴射期間は、平均有効圧を一定とする実験を行ったので、燃料消費率の良否に応じて変化する。

ここで、燃焼室形状の違いによる燃料噴霧の燃焼の違いを明確にするため、著者らの一人が提案¹³⁾した燃料噴霧の有効燃焼速度係数 K_e を用いて調べてみる。 K_e は熱発生率と燃料噴射率から末尾に示す方法で計算される。

図5は、1型燃焼室の場合について燃料弁噴孔数の違いによる K_e パターンの違いをプロットしたものである。横軸には燃焼率 Q/Q_T をとった。ここで Q 、 Q_T は、任意のクランク角までに発生した熱量の積算値、及び1サイクルあたり総発熱量をそれぞれ示す。この図の場合、 K_e の最大値は噴孔数がいずれの場合にも燃焼の極く初期に出現しており、燃焼が進むとともに K_e は低下している。燃焼の前期を除いて、9孔が最も燃焼速度が高く、10孔の場合は常に K_e 値が小さくなっている。

K_e パターンと機関性能の関係については、著者らがすでに詳細な報告¹⁴⁾をしているが、それによると燃焼速度 K_e 値の低下、特に燃焼後半における低下は燃料消費率を悪化させる。図3と図5の結果の関係は、その結論と同一の傾向を示している。

図6a, b, cに、燃焼室形状ごとに、燃料噴射角による K_e パターンの変化を示す。図a, b, cを比較すると、まずa図の1型燃焼室だけは前述のように K_e 値の最高値が燃焼の初期にあるが、他の二つの燃焼室の場合には、燃焼開始後徐々に燃焼速度が高くなっている。この傾向は2型燃焼室より3型燃焼室の方が顕著である。そして燃料噴射終了後に急速に燃焼速度が低下している。 K_e 値の全体的なレベルは1型燃焼室が最も低く、3型燃焼室が最も高くなっている。このように熱発生率パターンよりも K_e パターンの方が燃焼室ごとの燃焼の違いをよりはっきりあらわすことができる。

2.1節及び本節の結果から、燃料噴霧が噴孔から噴出した後、ピストンに衝突するまでの飛行距離が短く、燃焼室壁の干渉を早くから受ける場合は、燃焼速度が高くなり、燃料消費率が悪化するものと解釈される。

つぎに3型燃焼室を用いて、燃焼室の高さを変えて行

図6a 噴射方向角による K_e パターンの変化 (1型燃焼室) 図6b 噴射方向角による K_e パターンの変化 (2型燃焼室) 図6c 噴射方向角による K_e パターンの変化 (3型燃焼室)

った燃焼実験の結果から燃料噴霧の燃焼速度 K_e のパターンの違いを図7に示す。この実験での機関運転条件は、給気圧以外は表1のとおりである。またこの実験では、圧縮比と燃焼室内空気量が変化するのを避けるために吸気弁開閉時期と給気圧を調節した。

図7aは、3水準の燃焼室の高さに対し、下向き11度の方向に燃料を噴射した場合である。図中の V_T はTDC

図7a 燃焼室高さの違いによる K_e パターン
の変化(噴射方向角11度の場合)

図8 供試燃料噴射率パターン

図7b 燃焼室高さの違いによる K_e パターン
の変化(噴射方向角19度の場合)

図9a 燃料噴射量の違いによる K_e パターン
の変化(燃焼室高さが低い場合)

図9b 燃料噴射量の違いによる K_e パターン
の変化(燃焼室高さが高い場合)

時の燃焼室容積、Hightはその時の燃料弁近傍の燃焼室高さを意味する。図から明らかなように、燃料噴霧の燃焼に対する燃焼室高さの影響は、ほとんど現れていない。つまり、11度の方向に燃料を噴射した場合、ピストンは燃焼を左右するほどの干渉を噴霧に及ぼさなかったものと考えられる。3型燃焼室に対して実験範囲内で図2のようにピストンTDCにおける燃料噴射方向を描くと、噴霧はピストンに衝突することになるが、長尾、池上ら⁹⁾の実験では、ピストンの動きによる気流のため燃料噴霧が多少カバー方向に吹き上げられる現象が報告されており、11度方向に噴射された噴霧はピストンに大きくはあたっていない可能性もある。

これに対して燃料噴射角をさらに8度ピストン側に向け19度にした場合が図7bである。この場合は燃焼初期には、燃焼室の高さの影響は見られないが、その後は燃焼室の高さが小さくなるに従って燃焼が悪化したことがわかる。これは、燃料噴霧がピストンと衝突し、その衝突までの自由飛行距離が、燃焼室の高さが低くなるに従って短くなっているためであると解釈される。

図9a, bは、供試機関に図2の3型燃焼室を装着し、1サイクルあたりの燃料噴射量を変化させて、その K_e パターンに対する影響を調べた結果を示す。図中の P_s は、給気圧を意味する。供試燃料噴射率パターンを図8に示す。1サイクルあたりの燃料噴射量を増やすには、図8からわかるように燃料噴射期間を長引かせる方法をとった。したがって燃料噴射量を増やすと、和栗の式¹⁷⁾から

も明らかのように、燃料噴射終了時の噴霧到達距離が長くなり、噴霧内の空燃比は、改善される方向にあるが、それだけピストンからの干渉も大きくなると想像される。図8の二つの燃料噴射率パターンの場合燃料噴射終了時の噴霧長さは、燃料噴射量の多い方が少ない方より約10%長くなる計算になる。しかしながら、図9a, bを見ると燃料噴射量の違いによる K_p パターンの変化はほとんどなく、特に燃焼後半は全く違いがないといえる。つまり実験範囲内での燃料噴射量の変化は、燃料噴霧の燃焼そのものに変化を与えなかったと言える。この現象については二通りの解釈ができる。一つは実験範囲がせますぎて、その効果を検出できなかったとする解釈であり、他方は、燃料噴霧はその大きさが異なっても、自由に飛行できる距離が同一ならば燃料の気化や周囲気体との拡散混合の程度がほぼ同一となり、その後の燃焼には違いが現れて来ないとする解釈である。ここに示した実験結果からは、そのどちらとも判断はできない。しかし1サイクルあたり燃料噴射量が6.6gと7.6gでは、もしこれが同一軸出力であったとすれば燃料消費率に10%以上も差を生じることになる。燃費の差が10%以上もあれば図3と図6の比較からわかるように K_p パターンにも大きい差が現れるはずである。しかし燃料噴射量がふえると機関出力も増大しており実測燃料消費率には大差なかった。このような経験から、ここでは著者らは後者の解釈をとっている。なお、図9から給気圧 P_g は高い方が燃焼が良くなることがわかる。

3. モデル装置による実験

供試機関による実験の結果、燃料噴霧と燃焼室壁との干渉が機関性能に大きな影響を及ぼすことがはっきりした。この結果に対する理解をより容易にするため、モデル実験装置を使用して、燃料噴霧と燃焼室壁の干渉の様子を観察することにした。

3.1 実験装置と実験方法 実験装置の概要を図10に示す。円筒型耐圧容器の中にピストン冠及びシリンダカバーに見立てた模型を傾けて入れた。燃料弁は単孔で、円筒容器の上部に取り付けられ、常に容器の軸上を下方に向けて燃料を噴射する。供試機関の実験因子の

図10 噴霧観察用モデル実験装置

一つである燃料噴射角を実現するには、燃焼室模型の傾き角度を変えた。円筒容器内には供試機関の圧縮行程のTDC状態のガス密度を再現するため炭酸ガスを18ataの圧力で充填した。噴霧の成長の様子は、高速度カメラで撮影することにより観察した。その際写真は、2方向から撮影した。一つは、シリンダカバー側からピストン冠に向かう方向であり、図10はこの場合のカメラ配置を示す。この撮影のため、シリンダカバーの模型は透明アクリル板とした。他は、燃焼室断面方向の観察である。これは、図10の燃焼室模型を耐圧容器の軸のまわりに90度回転させれば可能になる。燃料弁は1回の写真撮影に対して1回だけ噴射させた。

供試燃料系諸元は、燃料弁開弁圧400ata、最高燃料噴射圧950ata(概数)、燃料噴射期間10ms、噴孔径0.61mmである。これを供試機関のものと比較すると、噴孔径が0.1mm小さい以外はほとんど差がない。

3.2 モデル装置による実験結果 図11a, b, cに3種の燃焼室形状の模型に対して燃料を噴射した場合の、噴霧の成長の様子を示す。各図とも上側がシリンダカバー側からピストン冠に向かって見たもの、下側が燃焼室断面方向に見たものである。燃焼室断面方向に見た写真では、左上方がシリンダライナー軸部、右下方がライナー壁部に相当し、噴霧の右側の白い斜線はシリンダカバーに見立てたアクリル板である。噴霧の左側の白い直線又は曲線は、ピストン冠を意味する。両者の間隔は供試機関のTDC状態にあわせた。

図11aは、図2の1型燃焼室に対するものである。噴霧は噴孔を出ると間もなくピストン表面に沿って這うように成長している。噴霧の外形を見ると周期的に波打っており、いわゆる壁面噴流状態¹⁸⁾を呈している。これは、壁面との摩擦により噴霧の進行がまたげられる結果であろうと考えられ、壁面に凝縮する燃料油も多いものと想像される。

図11bは、図2の2型燃焼室に対するものである。噴霧と壁面の衝突位置の噴孔からの距離は、1型燃焼室の場合よりかなり遠くなっている。これは、燃焼室容積を一定にすると、シリンダ軸近傍で燃焼室高さが大になるためである。しかし、ピストン面に衝突した燃料噴霧は、大きくシリンダカバー側へまきあげられている。この現象から、壁面へ衝突した時の噴霧はまだ充分前進能力を持っているものの、壁面から抵抗を受けてその運動量を失ったものと考えられる。燃料噴霧の横方向の広がり角は、壁面と衝突後、その位置から急に大きくなっている。

図11cは、図2の3型燃焼室に対するものである。シリンダ軸近傍の燃焼室高さは、2型燃焼室の場合よりさらに大になる。したがって、燃料噴霧とピストンとの衝突位置は、2型燃焼室の場合よりさらに噴孔から離れた所になっており、この燃焼室形状の場合が噴霧が最も長く自由に運動できる。ピストン面に衝突した燃料噴霧は、2型燃焼室の場合のようにまきあがることもなく、ピス

図 11 a 1 型燃焼室内での噴霧の成長(噴射方向角 7 度)

図 11 b 2 型燃焼室内での噴霧の成長(噴射方向角 15 度)

図 11 c 3 型燃焼室内での噴霧の成長(噴射方向角 15 度)

トン面の形状に沿って移動しており、衝突後の横方向の広がりも極端ではない。これは、3型燃焼室の場合は、噴霧と壁面との衝突までに燃料と周囲気体の混合が充分進み、燃料の運動量が周囲気体にかなり伝達されることによって燃料噴霧の速度が低下し、衝突時の噴霧の前進能力が2型燃焼室の場合に比較して減少しているためと考えられる。

以上のモデル実験から、燃焼室形状の違いにより、燃料噴霧が壁から受ける干渉の強さにかなり違いがあることがわかった。

4. 考 察

以上燃焼室の形状やその高さを変えて、燃焼に対する燃焼室壁の干渉効果を、主に K_c パターンを用いて調べた。その結果、燃料噴霧が噴孔から噴出した後、壁の干渉を受けずに自由に運動できる距離が長いかわりか、燃料噴霧の燃焼速度の速いか遅いかを大きく左右すると考えられた。すなわち噴霧の自由飛行距離が長い場合程、燃料噴霧の燃焼速度が高くなる。この結果は、高速ディーゼル機関に燃料噴霧と壁面との衝突干渉効果を利用して、燃焼改善を図る例があるのに比較すると、かなり違ったものになっている。この原因について考察を加えてみる。

まず著者らの研究室で画像解析法を応用し、自由空間に噴射された噴霧中の燃料濃度分布を実測した一例を図12¹⁶⁾に示す。図12では、燃料濃度分布を3段階の空気過剰率分布として示した。この図から噴霧中の燃料濃度は、噴孔出口に近いほどまた噴霧軸に近いほど高いと言える。松岡ら¹⁸⁾の研究によると、この燃料噴霧の中心部には、噴孔からある距離まで液柱が存在していることが報告されており、液柱の長さは噴射期間中のある時期以後は、ほとんど変化しないとされている。著者らの実験においても、空気過剰率が1より小さい部分の長さは、噴射開始後ある時間で一定の長さに達し、それ以後は、長くないことを見出している。一方、田辺ら¹⁹⁾が気体の間歌噴流によって実測したところによると、噴流軸上の任意の位置の流速は、噴流先端部を除いて噴射期間中はほぼ一定で、その大きさは定常噴流のそれと一致し、

大略噴孔からの距離に反比例する。また濃度分布も定常噴流のそれに一致するとされている。これらの結果から図12の $\lambda < 1$ の範囲内には、流速も高く燃料の微粒化が進行中で、周囲気体との混合の不完全な部分が存在し、 $\lambda > 1$ の領域は、液体の蒸発が完了し周囲気体との混合が進行している部分と考えられる。そして、噴射期間中の液柱の長さがほとんど変化しないこと、気体噴流の流速分布、濃度分布が噴流先端を除いて、定常噴流のそれにほぼ一致することから、著者らが実測したように $\lambda < 1$ の領域は、噴射持続期間中ある一定の大きさを持ち、 $\lambda > 2$ の領域のみが拡大を続けることになる。一方、Witzeら²⁰⁾の気体噴流に対する実測結果によると、噴流中の任意の位置の流速は、噴流がその位置に到達するとそれまでの零から急激に有限の値を示すようになり、噴射終了と同時に急激に減衰する。そしてこの減衰は、噴流中のすべての位置で同時に起こり、また各位置における乱れの強さも同時に減衰し始めると報告されている。噴流中の乱れの強さは、Johnstonら²¹⁾によると周囲気体中のそれよりはるかに強い。これらの実験結果から噴霧中の燃料と周囲気体との混合は、噴射終了後は噴射持続期間中に比べて、その速さがかなり低下するものと考えられる。

このような燃料噴霧のイメージを使うと、 K_c パターンが図9のような形になるのは、つぎの様に説明される。まず、燃焼初期は着火遅れ期間中に形成された可燃混合気が、急速に燃焼するが、着火遅れ期間が短いとその量は、燃焼室に存在する燃料の量に比べて少ないため K_c は小になる。その後燃焼の進行により燃焼室内の温度・圧力が上昇することから、蒸発速度・反応速度が高くなり、燃料噴射持続による活発なガス運動も加わって盛んに燃焼し K_c を高める。燃焼の後期には燃料噴射終了によりガスの乱れ運動も減衰し、新気の燃焼域への取り入れ速度が落ちて、燃焼域の酸素濃度が低下する上に、燃焼域の拡大速度も落ちて、 K_c が低下するものと考えられる。

以上の説明から、燃料噴霧の燃焼速度 K_c を高めるには、燃料噴射期間中に燃料噴霧が持つ運動能力を最大限有効に活かして、その期間中にできるだけ燃料と、周囲気体との拡散混合を達成することが重要であると言える。

ところで、図11の写真からわかるように、1型燃焼室の場合は、噴霧は噴孔から噴出後すぐ壁面噴流の形になっている。この場合は、噴霧の流速が大きい時に壁面に近づくと壁面での速度勾配が大になり、噴霧は大きい流動抵抗を壁面から受けて運動能力を急激に失うことになる。その上に噴霧側面の円錐部と周囲気体との接触面積も減少して、そこから噴霧中に流入する周囲気体が減ること、壁面に凝結する燃料量が増大し、壁面による消炎効果も大になること、噴霧中の乱れなどのガス運動の減衰が大きいことから、燃焼速度も落ちずすの排出量が増大したものと考えられる。なお、国吉らによると、噴

図12 燃料噴霧中の空気過剰率分布

流中への周囲気体の流入量の内、噴霧側面の円錐部からの量は、全体の25%以上とされている。

3型燃焼室の場合は、噴霧内の流速が速い部分では噴霧はほぼ自由空間にあり、側面円錐部からの周囲気体の流入も充分行われる。したがって、噴流中の燃料と周囲気体の混合が充分進行し、噴霧の前進能力が低下してから壁面にあたるようになるため、壁面での速度勾配は小さくなり、流動抵抗も小になる。この場合は、壁面に凝結する燃料もほとんどないと思われ、壁面から燃焼域への冷却効果も大きくないと考えられる。この結果1型燃焼室に比較して、3型燃焼室はかなり燃焼性能が良く、2型燃焼室は多くの点で両者の中間を行くことから、中間の性能を示したものと思われる。

3型燃焼室の高さを変えて行った実験の結果で、高さの K_e パターンに及ぼす影響に対する解釈も、上に述べた燃焼室形状変更試験の場合と全く同じ理由で説明される。また、燃料噴射量を変えた実験では、先に述べた噴霧のイメージを用いると、やはり噴霧の自由飛行距離が同じであれば、多少噴射期間が増大もしくは短縮しても、燃焼に影響しないと解釈する著者らの考えで理解してよいと考える。

なお、3型燃焼室で噴射方向15度より19度、23度の方が性能がよいのはピストンとの衝突後の噴霧の運動方向も、多少性能に影響することを示すものである。この点については著者らは、文献9)の解釈と同意見である。

5. ま と め

中速ディーゼル機関を用いて燃焼室の形状を変え、燃料噴霧の燃焼がどんな影響を受けるかを実験的に調べ、考察を加えた。その結果、燃料噴霧が噴孔から噴出した後、できるだけ長い期間、壁の影響を受けず自由に運動できるような形状の燃焼室の方が燃料噴霧の燃焼速度が高く、機関性能(燃料消費率、排煙濃度など)が良いことが明らかになった。これは燃焼速度を高める第一条件である周囲気体と燃料との混合が、燃料噴霧自身が持つ周囲気体に対する相対運動能力によって達成されると考えられることを示しており、この噴霧の運動能力をできるだけ長期間温存できる形状の燃焼室が、良好な機関性能を示したものと解釈できる。

中速ディーゼル機関では、燃焼室形状はとかく偏平になりがちであるが、この実験の結果から、燃焼室を設計するための一つの指針が得られたものと考えられる。

文 献

- 1) 国吉 光、慶応大学博士論文(1977)。
- 2) Lustgarten, M T Z 35 (1974) 9 273.
- 3) 常本・ほか2名、第3回内燃機関合同シンポジウム予講集(1982)73.
- 4) 広安・ほか2名、機論、46-403(1980)531.
- 5) 堀・ほか2名、機講論、760-7(1976)57.
- 6) 堀・ほか2名、機講論、770-4(1977)34.

- 7) 長尾・ほか4名、機論、38-311(1972)1866.
- 8) 長尾・ほか4名、機論、38-311(1972)1875.
- 9) 長尾・ほか3名、機論、39-324(1973)2539.
- 10) 神本・ほか3名、機論、46-403(1980)540.
- 11) 神本・ほか3名、機論、47-414(1981)392.
- 12) M. Kawakami・ほか2名、ISME '83 Technical Paper (1983) 303.
- 13) 下津・ほか1名、機論、47-418(1981)1135.
- 14) 下津・ほか3名、機論、51-461, (昭60), 232.
- 15) 菱田・ほか1名、機械の研究、35-11(1983)24.
- 16) 坂根・ほか3名、機械学会第62回全国大会予稿集(1984).
- 17) 和栗・ほか3名、機論、25-156(1959)820.
- 18) 松岡・ほか1名、第3回内燃機関合同シンポジウム予講集(1982)85.
- 19) 田辺・ほか5名、機講論、848-2(1984)97.
- 20) P. O. Witze, AIAA Journal 21-2 (1983) 308.
- 21) S. C. Johnston・ほか4名、SAE Paper 790092 (1979).

(付録) K_e の計算方法 文献13)に詳しいので、概要のみを記す。燃料噴射開始及び燃焼開始のクランク角をそれぞれ θ_1 , θ_c とし、任意のクランク角を θ とする。時刻 θ で燃焼室に残る未燃燃料の質量を f とする。燃料噴射量及び熱発生量をそれぞれ W , Q で表し、1サイクルあたりのそれらを W_T , Q_T とすると次式が成立する。

$$f = \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{dw}{d\theta} d\theta - \frac{W_T}{Q_T} \int_{\theta_c}^{\theta} \frac{dQ}{d\theta} d\theta$$

燃料の低位発熱量を H_U とすると、1サイクルあたりの理論熱発生量は $W_T \cdot H_U$ となる。これに対する Q_T の割合を η_c とすると、 $W_T/Q_T = 1/(\eta_c H_U)$ となる。また、基準温度での燃料油の密度を ρ とし、 f を1個の滴と仮想した場合の径を D とすると、 $f = \pi \rho D^3/6$ となる。これらを上式に代入し、両辺を θ で微分して整理すると、

$$\frac{dD^3}{d\theta} = \frac{4}{\pi \rho D} \frac{dW}{d\theta} - \frac{4}{\pi \rho \eta_c H_U D} \frac{dQ}{d\theta}$$

となる。この式の右辺第1項は、燃料噴射による仮想滴の膨張速度を、第2項は燃焼による収縮速度を表す。この第2項に η_c をかけて、その結果を時刻 θ での K_e とする。

$$K_e = \frac{4}{\pi \rho H_U D} \frac{dQ}{d\theta}$$

この式の右辺は、準定常理論による単滴の燃焼速度係数と同じ表現になっており、 K_e は、燃料噴霧をそれと同一の未燃質量をもつ単滴に仮想した場合の燃焼速度係数と考えられる。 K_e の物理的意味については、文献13)にて考察したが、簡単にはつぎのように考えられる。基準温度、大気圧状態で質量が f の単滴の燃焼速度係数を k とおく。 $X_e = K_e/k$ で X_e を定義すると、それは燃料を高圧高圧雰囲気中へ微粒化して吹き込むことにより、基準状態で1滴として燃焼させるよりどれだけ大きい燃焼速度が得られるかを意味する。したがって、 X_e は f の値には関係せず、燃料噴霧の物理的・化学的状態、たと

えば雰囲気ガスの運動状態の適不適, 燃料の分散度, 微粒化の程度など燃料噴霧を特性づける多くの因子の影響を反映するものと考えられる。一方 k は, 燃料の燃焼性をあらわしており, 実験的に f の値に関係しないことがわかっている。したがって, $K_e = X_e \cdot k$ と考えることにより K_e は燃料の燃焼性をふくむ燃料噴霧の燃焼そのものを, 直接評価する強度因子であると解釈することができる。

〔質 疑 応 答〕

質問者 北見工業大学 常本秀幸

〔質問〕 とくに燃焼状態と噴霧との間の関係を実験的かつ理論的にも評価するなど興味深く拝見させて頂きました。さて, いくつか質問がございますのでご教示願えれば幸いと存じます。

1) 貴論文の実験結果におきましては, 燃料噴射時期の影響には触れられておりませんが, 1~3 型の燃焼室の結果はすべて同一の噴射時期で得られたものでしょうか。もし, そのような場合であれば, 噴射時期を変えることによってノズル位置とピストンとの距離(噴霧の運動長さ)が変わり, 例えば 1 型の燃焼室であっても燃費あるいは吐煙が改善される可能性はないでしょうか。

2) 図 3 におきまして, 各タイプの燃焼室では燃費及び吐煙の面からは 9 孔のノズルによって良好な値が得られておりますが, とくに噴霧挙動の上から, その理由はどのように考えれば宜しいでしょうか。

3) 熱発生率曲線図 4a~4c 及び K_e 線図 6a~6c は, 同様の比較をしていることにはなりますが, K_e 線図でなければ評価できない部分はどのような点でしょうか。

4) 1 型燃焼室の性能が悪い原因を噴霧が早期に壁面に付着したためと説明されておりますが, M 燃焼室のように積極的に付着させる場合もあります。この点から考えると, 1 型では燃焼室内における空気の状態分布と燃料の質量分布が適切でないことも原因と考えられますがいかがでしょうか。

〔回答〕 1) 図 6 までに結果を示す実験は, バルブタイミング, TDC 時燃焼室容積, 給気圧, シリンダ背圧, 機関回転数, P_i をそろえた上で, 燃焼最高圧が 131.03 ata になるように燃料噴射時期を調節しながら行った。したがって, 燃焼室形状によって, 燃料噴射開始時期は少しずつ違っている。1 型では 165~168°C A-ABDC の間, 3 型では 168~170°C A-ABDC の間である。この程度の時期の相違は, 同じピストンならば, この時期の燃焼室の高さを 5mm 程度変化させる。しかし, 燃料弁近傍では, ピストン冠の形状の違いによる高さの差の方がこれより大きい。また, 燃料噴射期間は, 30°C A 位あり, 燃料噴射期間は, TDC の前後にまたがる。したがって 1 型の燃焼室で壁の影響を軽減しようとする, かなり TDC 時の燃焼室容積を大きくする必要があり, 実験目

的範囲外になるので, 実験していない。

2) むずかしいご質問で確実なご解答は致しかねる。9 孔では, 噴霧 1 本あたり 40 度の角度が割りあてられる。噴霧円錐角は 20 度程度までと考えられるから, 噴霧により, 燃料弁からライナー方向へ向かう流れが 20 度を占有し, その噴霧の進行によって, 周囲に誘起されるガス運動にも 20 度程度の角度が割りあてられる。この両方に同じ程度の角度が割りあてられるのが, スワールの無い場合の空気利用率から考えて, バランスがよいということかと推定している。諸先生方のお教えをお願いします。

3) 熱発生率は, 値そのものが, 燃焼室に存在する未燃燃料の質量が多くなれば大きくなるという容量性因子であるから, 燃料噴射開始後その終了までは熱発生率が大きくなり, 噴射終了後は漸減するといったパターンは, いつの場合にも見られる。従来のような熱発生パターンによる燃焼の比較は, この熱発生率の増大や減少の勾配もしくは, それから計算される熱効率による比較が主で, 燃料噴射側の挙動を考慮しないサイクル論的な側面が強いものであった。これに対し, K_e パターンは強度因子であるため, 燃焼期間中のどの時点で燃焼そのものの差がどの程度あるかといった細かな, 定量的な比較ができる。そのため, 実験因子の噴霧燃焼に及ぼす影響について考察しやすい資料となる。

4) M 燃焼法に限らず, 最近の直噴型高速ディーゼル機関も燃焼室壁に噴霧を付着させていることは認識している。これらと 1 型燃焼室の相違点として, 空気分布に対する付着点の位置の問題があげられる。前者の場合は, いずれも噴霧が壁に衝突し, 燃料は強いスワールに乗って横方向へ移動することによって, 燃料の微粒化と分散を改善する。そして, 空気は付着点より燃焼室中心側に大部分が存在しているから, スワールの熱ピンチ効果等を考えあわせると, 燃焼期間中にも空気利用率の向上が期待できる。

一方, 1 型燃焼室の場合は, 噴霧と壁のなす角度が非常に小さい。しかも, 空気の分布は, 付着点よりさらに遠方の方がはるかに多い。この遠方にある空気を利用するには, 噴霧自身の運動能力に期待するしかないが, 壁に付着した噴霧はその能力を急激に失ない, 遠方への到達が困難になる。

このようなことから, ご指摘のように, 1 型の場合は燃料と空気の分布の仕方が不適切になったもので, その程度が噴霧の付着により強調されたと解釈している。

質問者 阪神内燃機工業(株) 堀 雄一

〔質問〕 5 頁の図 7a と 7b を見ると 7a の方が噴射角度が小さく, 噴霧の自由運動空間が多いにもかかわらず, K_e 値は少なくなっている。

結論のところでも述べられていることを相違していると思うが如何。

〔回答〕 噴射角度 11 度は, 噴霧円錐角を考慮すると,

静的にはシリンダカバーとは1~2度しかあいていない。一方文献9)の池上らの報告では、噴霧がピストン上昇と共に上方に押し上げられる現象が指摘されている。これらから著者らは、ご指摘の図7aでは、噴霧が噴射期間中にシリンダカバーに触れ、それに沿って成長し燃焼したものと解釈している。図7aとbを比較して、aの場合には、燃料噴射期間の中期から末期にかけて K_e に盛り上がりがないことが、このことを示唆しているものと思う。

質問者 同志社大学工学部 藤本 元

〔質問〕 1) 図9a)~b)~c)では噴射期間一定にして熱発生率を比較すべきと思いますが如何。

2) 燃焼室高さを变化させた実験では圧縮比一定でしょうか。

3) 噴射率を変化させた実験では図8の如く噴射終了で制御されている。したがって噴霧の条件は $W_T=6.6$ と $W_T=7.7$ では後者は約25℃Aまで前者と全く同じ経過をたどるはずである。もちろん衝突までの時間、飛行距離の問題があるが、図9bで燃焼の前半で K_e が異なるのはどのような理由によるのでしょうか。

4) 図12は直接写真によるのでしょうか。ある時間で $\lambda < 1$ の部分が一定になるとありますが、これは噴射側の条件例えば、噴孔径、噴射角度等によらず一定なのでしょうか。

〔回答〕 1) 著者らの実験の目的は、機関出力を保証した上での燃費の改善であり、したがって、ご指摘のように噴射期間を一定にしようとすると、燃料噴射率を実験ごとに変えなくてはならない。噴射率自体は燃焼に対

して重要な影響を持つ因子であるとの認識から、今回は噴射率を一定にした実験を行った。したがって機関性能の良否により、1サイクルあたりの燃料噴射量や噴射期間が異なった。これらの変化は熱発生率パターンを変化させることはご指摘のとおりで、その影響をできるだけ小さくする燃焼判定因子として、 K_e を使用した。

2) 機関の静的な圧縮比は、吸気弁閉時期を変更して同一になるようにした。また、給気温度と圧力を変化させて、シリンダ内ガス量も同一にした。したがって、この実験では、燃焼最高圧は実験ごとに異なる。

3) 図9の実験は、ご指摘のような理由から少なくとも燃焼前半は同じ K_e パターンになると考えて行った。本報に示した実験結果の中で、そのような結果を予め予想できるのは、図7、図9の4図であり、そのうち3図まではこの予想を支持している。燃焼の前期は初期燃焼による圧力波の発生などから、図4に示すように実測の熱発生率の時間変化が大きく、計算機によってそれを平滑して K_e 値を計算する場合の平滑化の程度に問題が残る。図9bの場合も主として、その辺の影響である。

4) 透過光による直接写真を画像解析により処理して、噴霧中の燃料濃度分布を求め、それを同一の条件で撮影した10枚の写真について平均したものである。 $\lambda < 1$ の部分の大きさは、著者らの実験と、松岡らの実験(文献18))で異なっており、噴孔径等、噴射系因子の影響を受けるものと考えられる。著者らの実験の詳細については、文献16)を参照されたい。