一回圧縮装置による噴霧燃焼についての研究 (スキッシュの着火遅れと熱発生率への効果について)*

服部 広司** 平子 善夫***

A Study on the Spray Combustion by Means of a Rapid Compression Machine
(Effects of Squish Speed on Ignition Delay and Heat Release Rate)

By Hiroshi Hattori, Yoshio Hirako

A rapid compression machine is very useful for the research to analyse fundamentally the spray combustion process of diesel engine. So far as we know about the air motion in the combustion chamber, there exists a considerable literature on the contribution of swirl to the combustion process, but little work has been done in order to estimate that of squish.

This paper presents the effects of the squish on the ignition delay and the heat release rate by means of a rapid compression machine. As a result, the presence of the squish makes the ignition delay shorter, the total heat release increases about 50% by the squish as compared with no squish, and the squish improves the utilization of air not only in the radial direction of cylinder but also in the tangential direction.

1. ま え が き

ディーゼル機関における噴霧燃焼において、燃料噴射から自己着火を経て燃焼終了に至るまでの過程は非常に複雑である。また、この過程は空気温度、空気圧力、空気運動、燃料噴射特性などの諸因子により規定され、これらの因子が同時に作用するので、実機関で各因子の影響度を個々に調べるのは容易なことではない。このために、実機関による研究はもとより、実機関を模擬した燃焼器、たとえば、定容燃焼器¹⁾、急速圧縮装置^{2), 3), 4)}、衝撃波管⁵⁾などによって燃焼過程が定性的、定量的に研究されている。

この中でも急速圧縮装置は混合気形成過程、着火過程およびその発達状況を調べるためには非常に便利であり、以前から独特なものが数多く考案され^{2), 3), 6), 7)}研究に供している。しかしながら、これらは主として予混合火炎に関するものが多く、噴霧燃焼の研究に利用した例は数少ない⁴⁾。

本研究は以上の事柄を考慮して、実機関をできるだけ模擬できるような急速圧縮装置を試作し、燃焼過程におよぼす諸因子の効果を個々に独立させて調べようとするものである。試作機の製作にあたり、ピストン変位ができるだけ実機関に似ており、燃料噴射系が実機関と同等

とみなせる機構とすること、過給時の燃焼過程も研究できるように十分な強度をもっていることなどに特に配慮した。

従来、燃焼におよぼす因子の中で空気運動の燃焼過程への影響について研究した例は数多くみられる。とりわけスワールだけを与えた場合の影響を調べた研究は数多いが、スキッシュだけを与えた研究例は少ないようである⁸⁾。そこで、ここでは空気運動のうちでもスキッシュだけを与えた場合に着火遅れと熱発生率にどのような効果があるかをごく概括的に調べたので報告する。

2. 試作一回圧縮装置の機構

急速圧縮装置は従来から数多く考案されており、リンク機構によるもの、重錘の落下エネルギーや空気圧力を利用したもの、衝撃波管を利用したものなどがある。

本研究では、実機関をできるだけ模擬でき再現性の良い点からリンク機構を採用した。図1にその作動原理を示す。この機構は、一対の歯車、クランク軸、コネクティングロッド、スライダおよびガイド棒、そして、ヨーク、電磁石およびスライダ軸間距離調整用爪により構成されている。図1(a)において、2本のクランク軸はO、O'を中心として矢印方向に回転し、一対の歯車によって $\theta = \theta'$ となるように調時されている。クランクアームOA、O'A'、コネクティングロッドAB、A'B'およびヨークBB'はリンク機構を構成しているので、クランク軸が回転するとヨークは上下運動を行なう。ただし、この場合にヨークの横方向の運動は拘束され水平に保たなければなら

* 原稿受付 昭和52年9月1日

昭和52年春季学術講演(昭和52年5月26日)

** 正会員 大阪産業大学工学部(大東市中垣内3-1-1)

*** 正会員 大阪府立大学工学部(堺市百舌鳥梅町4-804)

Fig. 1 Crank mechanism of Rapid Compression Maschine.

ない。これは一対のガイド棒により行なわれる。

なお、クランクアーム長さがコネクティングロッドの長さの2分の1で、クランク軸中心間距離 OO' がヨーク長さ BB' とクランクアーム長さ OA (または、 $O'A'$) の2倍との和に等しい場合、クランク角度 $\theta = \theta' = 2n\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) において、点 O, A, B, B', A', O' が x 軸上にくるが、この時のヨークの運動を解析するとヨークはその運動方向にある大きさの速度を持っているので、 x 軸下部から上部へまたはその逆方向に通過する。

このようなヨークの運動は、図1(1)または(2)のようにヨーク長さ BB' を 2δ (δ : 微小長さ) だけ大きくすることにより、 x 軸の下部だけまたは上部だけに限定して運動させることができる。

このリンク機構を一回圧縮装置に利用するためには、図1の(a)から(f)の運動と図1(1)の運動を次のように組み合わせることによって達成できる。最初、ヨーク長さ BB' を図1(1)のように 2δ だけ長くして x 軸下部に限定して運動させておく。任意の時点で、 δ を0とすることにより、ヨークは図1(a)~(f)の運動状態に移行し、ヨークは x 軸を下から上へ通過し、最上点(図1(e))に達する。続いて下降し再び x 軸を上から下へ通過する。ヨークが x 軸下部にもどってきたとき、再びヨーク長さを 2δ だけ長くすると、ヨークは図1(1)のように x 軸下部で限定運動を行なう。

このヨークの運動を一回圧縮装置に利用するためには、

ヨークの行程直線上で x 軸の上部に自由ピストンを置いておくと、ヨークが x 軸の上部で一回だけ往復運動する時の上昇行程でピストンは突き上げられ、ピストンとヨークは同じ運動をする。その後、ヨークは前述のように x 軸の下部で限定運動するので、再びピストンを突き上げることはない。このように、ピストンとヨークが x 軸上部で一回だけ運動したときを圧縮に利用すれば、一回圧縮が達成できる。なお、ヨーク軸間距離 BB' は、図2に示すように、 B, B' 点を BB' の延長方向にスライドできる構造とし、スライダが外側にあるときヨークは限定運動を行ない、内側にあるとき自由運動を行なう。このスライダの位置調整はヨーク軸間距離調整用爪を挿入したり、引き抜いたりすることにより行なう。

図3にピストン駆動部の写真を示す。

ヨークの x 軸上部における上昇行程、すなわち、ピストンの圧縮行程の揚程と速度を一般のピストン・クランク式機関のそれらと比較して図4に示す。ヨークは圧縮始めに静止しているピストンをある速度で急加速するので、ヨーク速度の低下、駆動部各部品のコンプライアンスなどにより、ピストンの揚程と速度は図中の一点鎖線で示すようになることが推定できる。ピストン揚程、ピ

Fig. 2 Piston yoke and sliders.

Fig. 3 Piston driving Mechanism.

- ① Piston yoke ② Sliders ③ Guide bars
- ④ Connecting rods ⑤ Crank shafts
- ⑥ Timing gears

Fig. 4 Piston stroke and velocity of R.C.M.

ストン速度とも一般のレシプロ機関のそれらと非常に良く似たパターンとなっていることがわかる。

3. 実験装置および実験方法

試作一回圧縮装置の概略組立図を図5に、その写真を図6に示す。装置は燃焼機構部、燃料噴射系統部、ピストン駆動部および付属部品により構成されている。ピストンの駆動は、可変速モータにより、フライホイール⑬、タイミングギア⑫、クランク軸⑦、コネクティングロッド⑭を介して、ヨーク⑥は最初クランク軸中心線(α軸)より下で限定往復運動を行なっている。ある時点で電磁石⑩をオンすることにより、ヨーク軸間距離調整用爪を引き抜くと、前述のようにヨークはα軸上部で一回だけ往復運動を行ない、その後、再びα軸下部にもどってきたときには電磁石はオフになっているので調整用爪が再び挿入されヨークは限定運行を行なう。ヨークが上部で一回だけ往復運動したとき、上昇行程でその行程上に置かれたピストンロッドを突き上げ、ピストン⑨により室

Fig. 5 Assembly drawing of R.C.M.

Fig. 6 Photograph of experimental equipment.

⑧内の空気を圧縮する。ピストンは、強度的不利を避けるために上死点で4個のストップ⑩が支持リング⑪の下に入り固定される。その結果、燃焼は定積燃焼となる。

一回圧縮装置において燃焼が一回だけに限られるので、燃料供給もピストン運動と同期させて一回だけ行なわなければならない。このための方法として、(i)噴射時急激にポンプコントロールラックを引張る方法、(ii)ノズル開弁圧テストにより一回噴射する方法、(iii)バイパスノズルを用いる方法について、噴射率測定⁹⁾により噴射特性の再現性を検討した。その結果、試作機において、(i)の方法では燃料噴射量の制御が容易でなく噴射毎の噴射率の変動が大きかった。(ii)の方法はノズルテストのストローク調整が適切に行なえなかったのと本装置に取り付けた場合の同期が容易でなかったので採用しなかった。したがって、本実験では(iii)の方法を採用した。

この方法は図7に示すように、1個の噴射ポンプと2個の噴射弁を用い、それらの開弁圧の差を利用して一回噴射を行なわせるものである。二つの噴射弁は、一方が燃焼室への燃料供給用で、他方が燃焼室へ燃料を供給しない場合のバイパス用ノズルである。バイパスノズルは

Fig. 7 Principle of fuel injection for R.C.M.

ホルダ部に電磁石を組み込み、磁石をオンすることにより開弁圧が高くなるように改造した。一回噴射の方法は次の通りである。

最初、ヨークの限定運動時に、バイパスノズルの開弁圧を燃焼用ノズルの開弁圧より低くセットし、電磁石をオフにしておく。この状態で噴射系内圧力（特に燃焼用ノズルのノズル室内圧力）がその開弁圧以上にならないので、燃料はバイパスノズルからのみ噴射され燃焼室へは噴射されない。一回だけの圧縮、燃焼時に、バイパスノズルの電磁石をオンすると開弁圧は燃焼用ノズルの開弁圧より高くなり、系内の燃料圧力によってバイパスノズル針弁はリフトすることなく、燃料は燃焼用ノズルからのみ燃焼室に噴射される。一回噴射後は、再び電磁石をオフにすることにより、バイパスノズルからのみ噴射される。このようにして一回噴射がピストン運動に同期して達成できる。同期はヨークの運動と連動させ電磁石の開閉をパルス制御し、SCRによりスイッチングすることにより行なった。なお、噴射ポンプはクランク軸により駆動され、噴射時期はポンプとクランク軸の連結状態を変え、それに合わせて電磁石の開閉を変えれば任意に選ぶことができる。

この方法によれば、噴射系内にはある残留圧力が維持され、噴射ごとの特性のばらつきが少なくなり、噴射量の制御も容易になった。なお、この方法による噴射率、噴射量をボッシュの噴射率測定法⁸⁾により測定した結果、噴射率の再現性は実機関の噴射系のそれとほとんど同じ位となった。

図8に燃焼室の断面図を、表1に主要な諸元を示す。

測定項目は、燃焼室圧力、シリンダヘッド温度およびノズルニードル弁リフトである。熱発生率計算用の圧力測定にはピエゾ圧力検出器を、その校正用にはストレイ

Fig. 8 Cross-sectional view of combustion chamber.

Table 1 Main dimensions.

シリンダ内径	φ100mm
ピストン行程	110mm
行程容積	863 cc
圧縮比	15
ノズル噴孔	φ0.2×6
燃料	軽油
比重	0.822
ノズル開弁圧	150 kg/cm ²

ンゲージ式圧力検出器を用いた。圧力信号は増幅器を通し、ノズルニードル弁リフトと時間パルスとともにブラウン管に描かせて写真撮影した。なお、熱発生率計算のための圧力データはフィルムから直接光学式コンパレータにより読み取った。

圧縮前温度は、圧縮前に燃焼室内に空気を入れ、ヘッド温度を一定に保ち空気を吸入して約5分間経過後の空気温度を細線熱電対温度計により数点測定しそれらの平均温度とした。実験の手順は、あらかじめ（実験を行なう約1時間前から）ヒータによりシリンダヘッドを加熱すると、ヘッド温度は300℃以上となる。この時、シリンダライナ、ピストン冠も熱伝導により十分加熱される。シリンダヘッド温度が最高になった後、ヒータ電圧を下げ除冷し、ヘッド温度が所定の値になったとき燃焼を行ない、測定した。同様にして、順次温度を下げ燃焼を行なわせた。

4. 実験結果

本研究では、燃焼室内の空気運動のうち押込みか流（スキッシュ）の燃焼過程への効果に注目しているので、流入か流（スワール）の発生しない状態で、スキッシュ速度を変化させてその影響を調べた。このために、図8に示すようにピストン冠を交換可能とし、スキッシュ速度の異なる4種類のピストン冠を製作した。それらは、Ⅰ形-円盤形、Ⅱ形-くぼみ内径とピストン径の比 $R=0.7$ 、Ⅲ形- $R=0.6$ 、Ⅳ形- $R=0.5$ であり、どのピストン冠に交換しても上死点での間隙容積が同じ、すなわち、圧縮比が等しくなるようにくぼみの深さを決めた。最大スキッシュ速度は計算によると¹⁰⁾、Ⅰ形、Ⅱ形、Ⅲ形、Ⅳ形ピストン冠で、それぞれ0, 2, 3, 4 m/sである。

4.1 着火遅れ 着火時期の検出には、圧力、温度、発光、イオンギャップなどを利用する方法があるが、ここでは圧力上昇法を採用し、燃料噴射弁の立ち上がり始めから明らかな圧力上昇が認められるまでの時間を着火遅れとした。この方法では、噴射弁の立ち上がりから実際に燃料が高圧・高温の空気にさらされるまでに噴射遅れがあり、その分だけ着火遅れは長くなる。図9に燃料噴射時の空気温度とスキッシュ速度の着火遅れにおよぼす影響を示す。燃料噴射時の空気温度は、圧縮前空気温

Fig. 9 Effects of squish speed on ignition delay.

度と圧力および噴射時の圧力から空気のポリトロップ圧縮として計算した。なお、図中の実線は Wolfer の着火遅れ式から求めた着火遅れである。スキッシュ無しの場合に比べて、スキッシュを与えることにより着火遅れは 1~2ms 短くなっている。また、スキッシュ速度を大きくすると、空気温度が 600℃ 以上で着火遅れはわずかに短くなっているが、その影響は少ない。図 9 は噴射量が 25mg/st の結果であるが、噴射量を 40mg/st から 100mg/st まで変化させても同様の傾向がみられた。

図 10 に燃料噴射時空気温度と燃料噴射量の着火遅れへの影響を示す。図から明らかなように、噴射量による着火遅れにおよぼす影響はほとんどなかった。また、スキッシュ速度を変えても同じ傾向であった。これは、噴射率の測定結果⁹⁾から、本実験に用いた噴射系の噴射率は噴射始めが同じで、噴射量の増加にともなう噴射期間が長くなるだけであるので、噴射量による着火遅れへの影響はみられなかったのであろう。

Fig. 10 Effects of fuel delivery on ignition delay.

4.2 熱発生率 本実験ではピストンが上死点で固定され、その後燃料が噴射され燃焼が始まる。したがって、噴射始めから燃焼終了まで定容過程となり、熱発生率は指圧線図から求めることができる。ここでは、A. Pischinger らの方法²⁾と同様にして計算した。熱発生率の計算結果の一例を図 11 に示す。

図 12 に噴射量とスキッシュ速度の総熱発生量と熱発生率の最大値におよぼす影響について示す。図中の点は同一条件で行なった計算結果の平均値をプロットしてある。燃料噴射量が 25mg/st のときスキッシュの有無またはその大きさにかかわらず、総熱発生量はほぼ同じ大きさであるが、噴射量を増加すればスキッシュを与えることにより大きくなる。これは、スキッシュを与えない場合、静止空气中に燃料噴射するので混合気形成が燃料噴射と燃焼流動により行なわれるだけであり、噴霧外にある空気の利用が行なわれないためであると考えられる。また、スキッシュはシリンダ軸断面方向の空気運動であり、各噴霧間の空気の利用度が低いので、噴射量に比べ総熱発生量が少なく軽油の低位発熱量の約 20~25% である。

スキッシュを与えないと着火遅れが長くなるにもかかわらず、熱発生率の最大値はあまり高くない。この

Fig. 11 An example of calculated heat release rate.

Fig. 12 Effects of squish speed on heat release.

ことから、スキッシュを与えないと、着火遅れ期間中に燃料は着火遅れ時間に相当して噴射されるが、形成される可燃混合気の量が少なく、その後、噴射された燃料も空気との混合がほとんど行なわれないために、急激な熱発生を伴わないのであろう。ただし、同一ピストン冠で着火遅れの長さに比例して熱発生率の最大値は高くなった。このことは、I 形ピストン冠と II 形ピストン冠による燃焼過程の高速度写真撮影および燃焼後に燃焼室内に形成されたすすの量によっても確認された。

4.3 高速度火炎写真 スキッシュの有無による燃焼過程への効果を観察するために、シリンダヘッドに直径 60mmφ の観察窓を設け高速度カメラにより毎秒約 5,000 コマで火炎を撮影した。その結果、スキッシュを与えることにより、噴霧形成が噴射と燃焼流動およびピ

ストン壁への衝突により行なわれているが、火炎の発達状況から主噴霧中の火炎はその維持時間が長くなることと噴孔近くで噴射による噴霧形成外にも火炎が発達しているため、最大噴霧幅内でシリンダ軸断面内にある空気の利用が行なわれていることが確認された。また、噴霧のピストンくぼみ壁への衝突により、円周方向壁近くに形成された混合気は、スキッシュが無い場合に比べてシリンダ中心方向へも移動しながら燃焼していることが明らかにになった。

5. あとがき

ディーゼル機関の噴霧燃焼過程を研究するために、リンク機構によりピストンを駆動する一回圧縮装置を試作し、再現性にすぐれたものを製作することができた。この装置によって噴霧燃焼におよぼす空気運動の効果を調べた。この場合、スワールを発生させないでスキッシュだけを発生させ、その効果を着火遅れと熱発生率により検討し、高速度火炎写真撮影により結果を確認した。本実験の条件で得られた結果をまとめると次の通りである。

- (1) 着火遅れはスキッシュの有無にかかわらず燃料噴射時の空気温度とともに減少した。
- (2) スキッシュを与えることにより着火遅れは短くなった。
- (3) 燃料噴射量はスキッシュの有無にかかわらず着火遅れにほとんど影響しない。
- (4) 総熱発生量はスキッシュを与えることにより最大で約50%増加した。
- (5) 熱発生率の最大値はスキッシュを与えることによりスキッシュがない場合に比べて、着火遅れが短いにもかかわらず高くなることがある。
- (6) スキッシュを与えることにより、最大噴霧幅内でシリンダ軸断面内にある空気利用度の向上はもとより、壁に衝突し円周方向に形成された混合気も、空気流れに乗ってシリンダ中心方向へ移動し燃焼するので、空気利用率はさらに改善される。

なお、本報告では、急速圧縮装置を用いて、スキッシュだけを与えた場合の効果を概括的に調べただけであり、今後さらに燃料噴射時空気圧力の着火遅れへの影響、スキッシュ速度の大きい場合、空気流動でもスキッシュのみの場合、スワールのみの場合および両者を同時に与えた場合の燃焼室形状に対する最適噴霧形態について、定性的、定量的に究明する必要があると考えている。

おわりに、本研究にご協力いただいたダイハツ工業(株)、ヤンマーディーゼル(株)、三菱自動車工業(株)およびディーゼル機器(株)に厚く感謝を表し、実験に協力された当時の大阪府立大学大学院、工学部学生諸君に感謝する。

文 献

- 1) 居倉, ほか2名: 機論, 41-171(昭50-5), 1559など

- 2) A. und F. Fischinger: MTZ, Jg. 20, Nr. 1, (1959) など
- 3) G. Sitkei: Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Diesel Motoren, Springer (1964).
- 4) 小笠原, ほか4名: 機論, No. 734-6, (昭48-3), 101など
- 5) 宮阪, 水谷: 機論, 41-347, (昭50-7), 2160など
- 6) 酒井: 機械の研究, 12, (4), 1960
- 7) F. Schmidt: Verbrennungskraftmaschine, 4, Aufl. 530.
- 8) 長尾, ほか3名: 機論, No. 44-9, (昭44-3), 73など
- 9) W. Bosch: MTZ, Jg. 25, Nr. 7, (1964)
- 10) D. Fitzgeorge et al: PIME (A.D.), No. 4, (1962~63).

〔質 疑 応 答〕

質問者 横浜国立大学 小栗 達

〔質問〕 p.68の図にシリンダ壁温度171℃と記入され、シリンダヘッド温度を高める方法がただ今の講演中にもありましたが、ピストンクラウン部の側の温度についてはどのようにされましたか。

〔回答〕 シリンダヘッドは図8に示しますように、電熱線により加熱し、可変変圧器により温度調整できるようにしていますが、ピストンクラウン部は直接加熱していません。そのために、実験を行なう前にシリンダヘッド部を約1時間加熱しますと、ヘッド温度は300℃以上となり、熱伝導によりシリンダライナやピストンも加熱され、直接測定していませんが200℃以上となっているものと推測しています。その後、自然冷却し所定温度で燃焼実験を行ないますので、ピストンクラウン、シリンダライナ部もほぼ所定の温度に近い値となっているものと考えています。今後、ピストンクラウン部とシリンダライナ部も加熱し、温度測定する必要があると考えています。

質問者 東京大学 津田公一

〔質問〕 p.65の下からp.66の上にかけてのご記述により一回圧縮の機構は理解できましたが、圧縮前に下方に滞留するピストンがどのように動き、どのように圧縮ははじめ状態が確定するのかご記述がないように見受けられます。

1. 下方滞留ピストンは図1左半の動きをするのですか。

2. もし、このように動くものとすれば、シリンダには吸気はいったりでたりして、一定吸気を与えるのにさしかえる場合がありうるように思います。いかがでしょうか。

〔回答〕 圧縮前にピストンは、図1(a)のヨークBB'の運動とは関係なく、O, O'を結ぶ線の上に静止しています。そして、ヨークがOO'線を越えて上部へきたとき、静止していたピストンがヨークBB'により突き上げられ、圧縮行程にはいります。ピストンはヨークの上死点すなわち図1(e)で固定され、ヨークのみが下降行程にはいり、OO'線の下降部で限定運動します。したがって

まして、ピストンはヨーク BB' が上部にきたときの上昇行程で一回だけヨークと同じ運動を行ないます。

1. ヨークは図 1(c) から上昇行程にはいり、 OO' 線を越えた直後からピストンを突き上げ、同図(e)までピ

ストンとヨークは同じ動きをします。

2. 以上のように、圧縮前にピストンは静止状態にありますので、吸入空気の出入りはなく、一定吸入空気が燃焼室に静止状態で保持されています。