ディーゼル機関における噴射圧力が点火・燃焼に及ぼす影響に就て

(昭和10年4月5日 第12期 定時總會講演會に於て講演)

正員 濱部 源次郎⁽¹⁾

正員 長尾 不二夫⁽²⁾

The Influence of Injection Pressure on the Ignition and Combustion of a Solid Injection Diesel Engine

By Genjiro HAMABE, Member, Fujio NAGAO, Member

摘 要

自動弁を用ふるディーゼル機関に於て燃料噴射弁の弁ばねの初圧を変へ噴射圧力、弁運動、及びシリンダ内の圧力を蓄電器の容量の変化を利用せる電氣的指圧計により同時に記録せしめ噴射圧力が点火燃焼に及ぼす影響を見出したものである。

1. 緒 言

ディーゼル機関の点火及び燃焼が噴射圧力により左右されることは明かである。然るに、従来この種の実験は圧力槽に限られ実際の機関に就てその影響を見出したものは殆ど無い。圧力槽を用ひて温度、圧力、空氣の流動に到るまで如何に実際の機関に類似せしめても実際の機関におけるそれ等が明らかでない以上正確にその影響を求めることは出来ない。実際の機関に於て、点火の遅れ、燃焼時間等を測定することは甚だ困難で且実験條件を一定に保つことが困難である。又圧力槽における如く実験條件を変へ得る範囲が自由でなく、従つて單獨の影響を見出すことが容易でない。著者は発振回路における蓄電器の容量の変化を利用せる指圧計及び光電管を用ひ、噴射圧力、シリンダ圧力、及び弁運動をオシログラフの同一フィルムの上に記録せしめ、点火の遅れ及び燃焼経過が噴射圧力により如何に変はるかを見出した。自動弁噴射に於て噴射経過に最も大きな影響あるものは弁ばねの初圧である。1回の噴油量を一定とすれば弁ばねの初圧により噴射圧力と噴射時間が甚だしく変はる。プランジヤの直径、噴口の面積を変へることによつても勿論噴射圧力は変はるが、本実験では噴射圧力を変へる方法として同一のノズルを用ひ單に弁ばねの初圧を変へることのみに依つて行つた。實際この方法が圧力を変へるのに容易で最も廣く行はれてゐる。

2. 噴射、点火、燃焼に対する一般考察

シリンダ内の燃焼は点火と主燃焼とに區別することが出来るが、1個の油粒に就てでなく噴射される油全体としての燃焼を時間的に考へるとこれを次の4期に分けて考へることが出来る(第1図参照)(Richardo⁽³⁾はこれを3期に分けて考へてゐる)。然しこれには明瞭な境界がある譯ではなく場合によりては円滑な曲線となり區別し難いことがある。

第1期は燃料が噴射されても圧力変化の殆ど無い時で所謂“点火の遅れ”と称せらるゝ部分で、この期は噴射された油が周囲の空氣から熱を吸収し或は蒸發或は分解してこの期の終りには各所に熟した可燃性混合ガスが出来る。従つてこの期には圧力の上昇は無く寧ろシリンダ内の熱を吸収するために下る傾向がある。著者の光電管による燃焼の研究によれば⁽⁴⁾この期には圧力の上昇は無くとも既に一部分に光を發して燃焼を始めてゐる部分も認められる。“点火の遅れ”は燃焼の準備期とも云ふべき部分でこの長短及びその間に起つた燃料の物理的及び化学的变化は續いて起る主燃焼に著しく影響するものである。

第 1 圖

“点火の遅れ”は油の自己発火点、その加熱速度、及び酸素密度により定まる。即ち自己発火点は油の種類により又同一の油でも空氣密度、圧力等に依り、加熱速度は油粒と空氣温度の差、油粒の大きさ、空氣と油粒の關係速度、空氣の密度圧力等によるから“点火の遅れ”はこれ等多くの因子により左右される。これ等の事柄は Tausz 及び Schulte⁽⁵⁾、Wolfram 及び Wentzel⁽⁶⁾、Bird⁽⁷⁾ 等により圧力槽の実験から見出されたもので実際の機関に就て試みられた例は無いがこれ等の事實は実際の機関の場合にも適用出来ると思ふ。

第2期は急に圧力の上昇する時で第1期の終りに充分熟

(3) Richardo, Diesel Engines. (4) 著者, 會誌第37卷第212号 (5) Z. V. D. I., Bd 68 (1924) S. 574 (6) Forschungsheft, 366 (1934) (7) Inst. Mech. Engrs. P. 955, 1926

1) (2) 京都帝國大學

した混合物に 1 箇所或は多くの場所から燃焼が起る時焔は高速度で傳播して全体が燃焼の状態に入る。従つてこの部分の燃焼は焔傳播の法則に従ふと見ることが出来る。故にその速度は空気の渦流、燃料の性質、混合状態による。多くの場合ディーゼル機関ではこの期に全燃料がシリンダ内に存在するのではなくこの時までには一部分が噴射されてゐるのみであるからガソリン機関に比し遙かに多くの過剰空気の下に燃焼を起すためガソリン機関における如く過剰空気により影響されることは無い、この期に於ては噴射する量より燃える部分が多くシリンダ内に残つてゐる油は次第に減少しこの期の終りには噴射された油の大部分は燃焼してしまふ。

第 3 期 既に燃焼が全体に擴がるとシリンダ内の温度圧力は著しく上り“点火の遅れ”は短くなり、燃焼速度は促進され、噴射されただけの油が順次燃える状態となる。この期に於て始めて噴射により燃焼を制御し得る時期になり、或は昇圧の下に或は恒圧の下に燃焼せしめ得る。

第 4 期 所謂“後燃え”の部分で燃焼は決して噴射と同時に終るものでなく特に噴射の終りには圧力降下のために大粒の油が噴射されその燃焼には長い時間を要す。

今噴射圧力を変へると油粒の大きさ及び混合状態が変るから点火及び各期の燃焼は変る。噴射時間が變つても影響されることは勿論で、燃焼時間に対して噴射継続時間を二つに區別する事が出来る即ち“点火の遅れ”より噴射継続時間の長い場合と短い場合である。換言せば噴射、燃焼が重なつて行はれる場合と噴射の終つて後に燃焼が始まる場合でこの時は第 3 期は全くない。自動弁噴射で弁の初圧を変へる時噴射圧力は勿論、噴射時間も變はり上の二つの場合が起る。

3. 実験装置

実験機関 小型の直接噴射式 4 サイクルディーゼル機関にして実馬力 16 HP、回転数 500 rev/mn、シリンダ直径及び行程 160×250 mm、圧縮比約 14 である。燃料噴射は自動弁により針弁の直径 8.6 mm、ノズルは 0.4 mm×4、針弁の揚りには制限はない。ポンプのプランジャは径 12 mm、脇路弁で噴射の終りを変へ調制をなす。

圧力測定 噴射圧力及びガス圧力測定には発振回路における蓄電器の容量の変化を利用せる指圧計を使用しオシログラフの振動子は自己振動数 6,000 Hz のものを使用した。この装置は著者が燃料噴射の実験に用ひたそのまゝのものである⁽⁸⁾。

弁運動の測定 第 2 図に示す如く針弁の先端に細隙を設け細隙の一方の楔は固定し他方は針弁により動かしその細隙の一方から光を送り他方で光電管で受ける。針弁の揚りに比例して細隙の幅が變はるから光電管に入る光量が變る。従つてそれによつて得た光電流により弁運動を測定することが出来る。細隙の幅は弁の最大揚程よりも遙かに大きくしてあるから細隙の閉ぢた時光が僅け弁の変位と光電流が一次的關係を失ふことは無い。光源と細隙が互に振動してもその距離に

第 2 図

2 段に抵抗増幅をなしオシログラフに記録せしめた。オシログラフの振動子は 6,000 Hz のものを用ひ、オシログラフの点の変位と弁の変位の關係は第 3 図に見る如く完全に直線的である。

実験 機関の出力を一定 (約 3/4 荷重) とし冷却水温度その

他の熱状態を一定し、

カムのところに接する

点が上部死点前 25°、

30°、35° の三つの場合

につき弁ばねの初圧を

0 から 317.5 atm の範

囲で数種類變化せしめ、

上記の方法により噴射

圧力、ガス圧力、弁運

動を同時に記録し、そ

れにより起る燃焼の變化を見た。弁ばねの変形とそれに相當する弁の開閉における圧力を第 4 図に示す。弁座の影響のために弁の開閉時の圧力は稍低い。出力を一定としたのでは弁ばねの初圧により機関の效率が變はるから 1 サイクルで燃える油の量が一定とならず、従つてその影響も關係するがガソリン機関における如く過剰空気の影響は甚だしくないからそれによる誤差は無視し得ると思ふ。

4. 実験結果

実験中の機関の運轉状態を第 1 表に、実験結果の諸元を第 2 表に示す。

第 5 図 a, b, c, d, e, f はカムの接触を -30° とした場合で各図に於て p_s は噴射圧力、 p_g はガス圧力、 N は針弁の運動、 z は 120 Hz を示す。a は弁ばねの初圧 0 の場合で圧縮行程の間は反対にガスの圧力が油 管に現れるプランジャが動き始めると噴射圧力は圧縮圧力に打ち勝つて急に上り弁も開き始めるが摩擦及び慣性のために弁の動きと圧力變化の間には常に遅れるがある。従つて噴射始めの圧力差も決して 0 にはならない。弁ばねが弱いため噴射圧力は低いのに拘ら

(8) 會誌 第 36 卷 第 197 号

第 1 表

実験 番号	カム接触 (度)	弁の圧力 kg/cm ²		荷 重 IP	回転数 rev/mn	冷却水 温度 °C	排気 温度 °C
		開	閉				
1	-30	0	0	13.50	500	35.0	460
2	"	63.5	53.0	13.47	499	35.0	400
3	"	127.0	106.0	13.40	496	34.0	360
4	"	190.5	159.0	13.45	498	35.0	355
5	"	254.0	212.0	13.45	498	35.0	335
6	"	317.5	265.0	13.41	497	34.5	350
7	-35	0	0	13.55	502	35.0	437
8	"	63.5	53.0	13.58	503	35.0	380
9	"	127.0	106.0	13.52	501	35.5	360
10	"	190.5	159.0	13.47	499	34.5	354
11	"	254.0	212.0	13.47	499	34.0	339
12	"	317.5	265.0	13.47	499	34.5	334
13	-25	0	0	13.47	499	34.5	470
14	"	63.5	53.0	13.50	500	34.5	430
15	"	127.0	106.0	13.50	500	34.5	378
16	"	190.5	159.0	13.50	500	34.0	367
17	"	254.0	212.0	13.47	499	34.0	364
18	-27	127.0	106.0	13.47	499	35.0	418
19	-37.2	190.5	159.0	13.47	499	35.5	340
20	-40.9	254.0	212.0	13.50	500	35.0	320

第 2 表

実験 番号	実際の噴射	噴射の 遅れ	点火の 遅れ	噴射の 時間	最大圧力 kg/cm ²	最大圧力 までの 時間	排気 温度 °C	燃料 消費量 g BHP/h
1	-10.5°	19.5°	13.8°	65.1°	36.0	12.5°	1.511	314
2	-11.5	18.5	13.1	37.5	38.5	12.5	0.642	245
3	-8.0	22.0	13.8	19.8	41.5	11.2	0.227	216
4	-5.2	24.8	14.2	17.9	41.0	11.0	0.086	212
5	-3.5	26.5	14.7	15.4	45.0	9.9	0.068	212
6	-2.0	28.0	14.5	15.4	44.0	9.4	0.100	214
7	-16.8	18.2	16.1	46.6	41.5	16.7	1.452	302
8	-14.6	20.4	15.5	24.4	45.0	14.5	0.560	238
9	-13.5	21.5	14.4	20.2	47.0	14.2	0.182	211
10	-9.2	25.6	13.2	16.9	47.0	12.0	0.095	206
11	-5.0	30.0	15.3	15.3	45.0	9.6	0.101	204
12	-2.2	32.8	16.4	13.8	40.0	9.5	0.140	208
13	-7.4	17.6	11.3	64.0	31.5	7.7	1.537	328
14	-7.4	17.6	11.2	63.3	34.5	12.1	0.698	254
15	-6.7	18.3	14.0	20.4	38.5	14.0	0.255	223
16	-5.7	19.3	13.0	19.3	40.5	9.9	0.058	216
17	+2.4	27.4	20.9	17.3	39.0	11.0	0.039	219
18	-7.6	19.4	13.0	19.8	37.0	6.5	0.220	215
19	-7.9	29.3	12.6	18.2	53.0	9.7	0.087	207
20	-7.4	33.5	12.2	15.6	62.0	6.9	0.040	200

ず弁の動きは大きく、脇路弁が開いても圧力の下りは極く緩かで噴射継続時間は非常に長い。ガス圧力は急激な変化も無く円滑な運転をなす。bは弁ばねの初圧 63.5 atm の場合で、この時は圧縮圧力が燃料管まで浸入することは無い。噴射の始まる時の圧力は高く噴射の遅れは大きく噴射継続時間は短くなる。弁の閉りは急になるが再開を起してゐる。ガス圧力は a の場合より急激に上り噴射時間と燃焼時間の重なりが減少して来る。cは 127 atm の場合で弁の開く時の圧力が益々高く噴射時間は更に短縮し燃焼は噴射の終りで起りガス圧力の変化は益々急激になる。dは 190.5 atm の場合で弁の開く時の圧力と開いて後の圧力が等しくなり燃焼は噴射の終りに始まる。e, f は夫々 254 atm 及び 317.5 atm の場合で何れも弁の開く時の圧力が開いて後の圧力より高く噴射が終つて後に燃焼が始まり圧力の上昇は甚だ急激で而も最大圧力は高く甚だしくフッキングを起こす。

第 6 図はカムの接触を -35° とせる場合、第 7 図は -25° の場合で a, b, c 等は第 5 図の a, b, c 等の弁ばねの強さに相當する噴射圧力、弁運動には変化なくガス圧力の上昇が同じ弁ばねの初圧に対し噴射の早くなる程急激になる。

以上はカムの接触を一定としたのであるが次に噴射の始めが一定になる様にカムの接触を加減し弁ばねの強さを変化せしめた。噴射開始を一定とするのは困難で -7.5°, -8.0° の

間を許した。この結果を第 8 図 c, d, e に示す a, b は第 5 図の a, b と一致する。カムの接触を一定とした場合は弁ばねを強くすると噴射の遅れが大で実際の噴射開始が遅れるため圧力の上昇が緩和されてゐたのであるがこの場合は噴射開始が一定であるから圧力の変化が鋭敏に現れる。

以上の結果を綜括して考へて見る。噴射圧力は弁ばねの初圧により甚だしく変はり特に弁の開く時の圧力、残圧圧力が変はる。弁ばねの弱い時は開口弁の如き変化をなすが、弁ばねを強くすると次第に噴射開始の圧力が上り遂には噴射圧力よりも高くなる。最大圧力及び残圧圧力の弁ばねによる変化を図示すると第 9 図の様になる。点線は弁ばねの強さと針弁の直径及び弁座から計算した弁の開閉に相當する圧力である。図に見る如く弁ばねの初圧に対し P_{max} , P_r は直線的に変化するが弁ばねの初圧の低い時は燃料管に圧縮圧力が逆入して開口弁の時の様な結果になる。噴射圧力はカムの押し初めを変へると背圧が多少変化するがその影響は殆ど無い。

噴射及び燃焼の時間的關係を図示すると上記第 5 図から第 8 図に相當して夫々第 10 図から第 13 図が得られる。噴射の遅れは弁ばねの初圧に相當して初め緩かに後に急激に増加する。弁ばねが強くなると噴射の始まるまでに噴射系統全体に含まれてゐる油の圧力を高い圧力まで上げねばならぬから噴射の遅れるのは當然である。点火の遅れは弁ばねの初圧

第 5_a 圖 第 5_b 圖

第 5. 図

第 5. 図

第 5. 図

第 5. 図

第 6. 図

第 6. 図

第 6. 図

第 6. 図

昭和 11 年 2 月]

第 6. 圖

第 6. 圖

第 7_a. 圖 第 7_b. 圖 第 7_c. 圖 第 7_d. 圖 第 7_e. 圖

第 8. 圖

第 8_a 圖

第 8_e 圖

には殆ど無関係で噴射が余り早過ぎても又遅過ぎても大となる傾向がある。噴射継続時間は弁ばねが強くなると噴射圧力が高くなり従つて同一のノズルに対して噴射率が大となるから同量の油を噴射するのは短時間でよい。尙實際には後に示す如く弁ばねが強くなると消費量が減少する。従つて1回の噴油量も減るので噴射時間は益々減少する。然るに点火の遅れは一定であるから燃焼と噴射時間の重りが次第に少なくなり遂に全く離れてしまふ。ガス圧力は弁ばねが強くなると上昇は益々急激になる。噴射が早くなつても同じ様な結果になる。弁ばねの弱い間は圧力変化は緩やかであるが燃焼は甚

第 11 圖

だ悪く後燃えも大きく排気温度も高く色も濃厚である。弁ばねを強くすると圧力変化は急激になるが燃焼は次第によくなる。然し或る程度以上圧力を上げるとノッキングが起るのみで却つて有害である。第 14 図に排気濃度、燃料消費量と弁ばねの初圧の関係を示す。排気濃度は第 15 図に示す如く長さ 30 cm, 直径 5 cm の管に煙を一定圧力、温度に於て排気管から取りそれに光を通し光電管により測定し煙の吸収率⁽⁹⁾で示したものである。

5. 実験結果の考察

点火の遅れ 噴射の開始する時の圧力が増加する時は噴射

(9) 光の強さを I_0 とすれば管の中を通過した後の光度は $I = I_0 e^{-\mu x}$ で示される。煙の濃度として μx を用いた。

昭和 11 年 2 月]

第 9 圖

第 10 圖

第 13 圖

第 12 圖

の始めの油粒は細かく空気との関係速度も大であるからその点のみから考へれば点火の遅れは減すべきである。然し同一のノズルを用ひて噴射圧力を上げる時は噴射率が大きくなり点火前に噴射される油の量が増加するため空気から熱を取ること多くシリンダ温度は下る。そのため遅れを長くする様な結果も考へ得る。又燃焼を始めるのに核が存在するとすれば圧力は低くてもその中に小さい粒もあり得るからそれから燃焼が進行して行くとすれば点火の遅れは圧力にはよらない。無暗に圧力が高いと油の速度到達距離も大となるから点火前にシリンダ壁に付着し空気との接触悪く点火の遅れることもあり得る。これ等の事柄が相關連し茲に実験した結果

では点火の遅れは噴射始めの圧力にはよらない。この事実は Tausz 及び Schulte⁽¹⁰⁾, Wolfram 及び Wentzel⁽¹¹⁾ の圧力槽の実験と一致するが、その時間は彼等の測定した値より遙かに小さく $0.004 \sim 0.005$ s で Neumann⁽¹²⁾, Schmidt⁽¹³⁾ が実際の機関で見出したのと一致する。著者⁽¹⁴⁾が Junkers 対向ピストン機関につき求めたものは更に短かく 0.002 s の程度である。

燃焼経過 噴射圧力を上げると油の霧化もよく速度も大で空気との混合よく燃焼はよくなる。然るに上に示す如く点火の遅れは噴射圧力には無関係であり、噴射時間は短くなるから点火前にシリンダ内に存在する油が益々多くなり、第2期の燃焼に於てこれが一時に燃えるために噴射時間の遅いの拘らず圧力の上昇は大である。噴射後に燃焼が始まるものに到つては圧力の上りは特に急激でノッキングを起し殆ど恒容燃焼をなす。この様なものでは噴射率により燃焼を制御することは出来ない。更に圧力を上げると油が点火前にシリンダ壁に付き燃焼も悪くノッキングも大で得る所は無い。噴射圧力の低い時は噴射継続時間が長く噴射燃焼が同時に行はれるために噴射により燃焼を制御することを得。且点火前に噴射される油も少くそれが第2期燃焼で一時

に燃えても圧力上昇は左程でなく第3期の燃焼も噴油率が小なるため圧力の上りは小さく恒圧燃焼に近い変化をなす。然るに噴射圧力が低くなると霧化、混合、弁の閉ぢが悪くなるから第4期の燃焼が多く効率は低下する。従つて一機関に対し必ず適當なる弁ばねの強さがあり、この機関では約 200 atm である。然し本実験は一定のノズルについて行つたため弁ばねの強さと同時に噴射時間を変つたのであるが、噴射時間を変へずに噴射圧力を変へる様な方法を用ひたならば更に變つた結果になると思ふ。噴射圧力をあげ噴射継続時間を短縮せしめることは寧ろ有害で、なるべく少量の油で点火せしめ第3期を最も長く第4期を短かくするのが最もよい燃焼を得る方法である。この目的を達するために種々の形の弁座が考案されてゐる譯である。

第 14 圖

第 15 圖

6. 結 論

- (1) 弁ばねの初圧を増加する時はそれに従つて噴射の遅れは増加し噴射継続時間は短縮する。
- (2) 点火の遅れは弁ばねの初圧には無関係である。
- (3) 点火の遅れが一定であるため弁ばねの強さを増す時は噴射中燃焼する部分が減少し遂には噴射後燃焼が始まるに到る。
- (4) 圧力上昇は弁ばねの強さが増すに従つて急激となり遂にはノッキングを起す。然るに燃焼は弁ばねの適當なる強さに於て最もよくなる。

(10) 前出 (11) 前出 (12) Z. V.D.I. Bd. 70 (1926) S. 1077. Forschungs heft 309 (1928) (13) Z. V.D.I. Bd. 75 (1931) S. 585 (14) 會誌 第 37 卷 第 209 号