無気噴射重油機関における燃焼進捗度

(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 小 林 明⁽¹⁾

Progress of Fuel Combustion in an Oil Engine of Solid Injection Type

By Akira KOBAYASHI, Member

摘 要

重油機関に於て燃料油の噴射と共に 続いて燃焼現象が起るがその進捗度を知るには気筒内動作ガスの化学成分の変化を観測する方法が考へらる。併しこれは動作ガスがこの時均質な混合気を形成して居らぬために適當な試料ガスの採取が困難であり満足な結果が得られなかつた。それ故別の方法として燃焼によつて供給せられる熱量は動作ガスの内部エネルギーの増加と機械的外部仕事と気筒壁への放熱とに消費せられるといふ関係からこの燃焼進捗度の算定を試みた。次に燃料油の噴射は自動弁を通じて行はれる場合燃料ポンプの吐出始めより多少遅れて来る。この自動燃料弁の開き始めより燃焼による圧力上昇の現はれる迄を点火遅れの時間と看做してこの遅れの時間をオシログラフで観測した。最後に無気噴射重油機関の効率比を決定する比較の標準たるべき理想サイクルとしては 2 段燃焼サイクルを適當とする事実を実験結果から認めた。

1. は し が き

無気噴射重油機関に於て燃料油噴射と燃料油ポンプ吐出との間の時間的遅れ、燃料油が噴込まれ始めてから燃焼による圧力上昇の現はれる迄の所謂点火遅れ及びそれ以後における燃焼進捗度に及ぼす原因を探究する事は特にこの種重油機関の高速化を計る上に於て必要な事である。然るにこれを実際の機関に就て観測する事はその現象が高温高压の密閉室内で而も高速度で不均質な動作ガス内で部分的に起るために極めて困難になつて来る。況んや観測結果より一般的結論を導く事とてを。筆者はこの問題解決の第一着を試みてその報告を爲し今後の方針に對し會員諸氏の御教示を仰がんとするものである。

2. 実験方法

燃料の元素分析、発熱量の測定、機関への供給空気量及び燃料油供給量の測定、冷却水量及びその温度測定、動作ガス試料の採取及びその分析、機関のサイクル数の測定等は凡て筆者の行つた空気噴射ディーゼル機関実験⁽²⁾の場合と同様であり計算法なども同様である場合が少くない。この度は新潟鉄工所製 SP1 型単気筒堅型無

気噴射式重油機関である。その内径 200 mm, 行程 320 mm, 回転速度 420 に於て実馬力 25 HP 程を出すものである。CO₂ ガス混合比により隙間容積は 0.000,873,6 m³ である事を知つた。従つて行程体積 0.000,053,1 m³ に對して圧縮比は 12.508 となる。尙連桿と行程との比は 2.250 に當る。

燃料油はタラカン油を用ひたがその比重は 15°C に於て 0.943 であり粘性はエンガラ度で 20°C に於て 6.4 度又 50°C に於て 2.2 度であつた。引火点は 756.4 mm Hg 25.5°C の大気中で 90.5°C であつた。元素分析の平均値は H=11.39, C=84.25, S=0.14, N=0.14, O=4.07, H₂O=0.04% でありそれ等容積発熱量は 9,947.0 kcal/kg であつた。

機関の弁線図は第 1 図に示す通りで吐出終りと吸込始めとの重なりが極めて少くこれが上部死点前で起るために吐出行程の終りに於て圧縮が起ると豫想せられたが結果は第 6 図に現はれてゐる通りである。

動作ガスの分析試料の抽出は燃焼時に於て動作ガスが不均質な混合気を形成してゐるため

燃焼進捗度を決定するだけの分析結果を齎さなかつた。併し吐出及び吸込行程に於ては燃焼の完結度、吐出及び吸込の程度等を決定し且インヂケータ線図と組合はせて動作ガスの温度を決定する事が出来た (第 9 図参照)。

第 1 図 弁線図

第 2 図

⁽¹⁾ 旅順工科大学

⁽²⁾ 機械学会誌 昭和 7 年 12 月

動作ガスの圧力変化はファルンボロ・インデケータで観測した(第6図参照)。他に第2図aに示す如く理研式圧電インデケータQと横河式真空管増幅器Aとの組合はせによつて特に燃焼時の圧力変化をオシログラフに移した。これとファルンボロ・インデケータによる圧力変化とは時間的には全く一致してゐる事を知つた。従つて圧力の絶対値はファルンボロ・インデケータによつて決定する事にした。

一方第2図bに示す如く自動燃料弁の弁棒の先端に軟鉄円板Aを取付けこれに正對して上方に抵抗2,000Ωの受話器用電磁石Mを置き軟鉄片Aと電磁石Mとの間の空気間隙が燃料弁の自動的開閉に應じて変化する仕掛にして置く。然る時は図に示す回路によつて電圧はAとMとの空気間隙の自乗に大体反比例しAがMに近づく速度に正比例する。これを真空管で増幅してオシログラフに移したのである。この方法によつて自動弁の開き始め、全開位置、閉ち終

第3圖 自動燃料弁の運動とガス圧力の変化

り等の時期を明瞭に記録する事が出来た。第3図は各荷重運転におけるこの種オシログラフの一部を示す。下方の水平点線は点の間隔が1/100sを示す事になつてゐる。尚この方法によれば回路の電圧によ

りて燃料弁の開閉運動を示す曲線は著しくその振れの大きさを変ずる筈で、その揚程の絶対値を決定する事は難しい。然るに電磁気条件を同一にして各荷重運転に於て燃料弁開閉曲線をオシログラフ上に移して見たがその結果は第4図に示す如く弁の最大揚程は荷重の如何に拘らず一定である事を知つた。又自動燃料弁の揚程の実際の大きさを調べるためにホプキンソン・インデケータを用ひて80倍に擴大して観測した結果0.36mmである事を知つた(第3図右上寫真図参照)。次にオシログラフに上部死点を記入するために第2図cに示す如くはずみ車Fの側面外周近くに直径10mmの円柱状突起を軟鉄片で取付けピストンが上部死点に來た時この小突起が固定

第4圖 自動燃料弁の開閉運動

電磁石Mと正對する仕掛を用ひた。然る時はMのソレノイドを流れる電流の強さが変化するからオシログラフ上に上部死点に相當する波形を畫く。尚クランク軸回転運動の不齊によるオシログラフ上の死点位置の修正を施すためにガイガー振動計によつてはずみ車の所で回転の振れを観測した(第5図参照)結果0.36°~1.01°の修正を加へるべき事を知つた。

第6図a及びbはファルンボロ・インデケータより得たるガス圧力の変化を示すものであり各荷重運転における圧力変化の有様を比較するために第6図cに示す如く同一基線上海に移して見た。

又荷重運転の際に得たオシログラフを集めると第7図の如くなる。これ等により機関に斯る荷重の大小に應じてガス圧力の変化及び自動燃料弁の開閉の有様が違ふ事を比較し得た。

3. 実験結果

a. 自動燃料弁の開閉運動——実験に用いた機関の調速法は燃料ポンプの吐出行程の終末期に洩出弁を開放して燃料油の供給量を加減するのである。これに對して自動燃料弁の

第5圖 ガイガー振動計によるクランク軸回転の不齊

料油の供給量は弁の開閉位置に在る時間の長さに比例しこの場合には平均 55 g/s の割合で噴射せられてゐる。燃料弁の開閉運動は荷重が増す程緩慢になるのは機関の回転速度が次

第6圖 b 吐出及び吸込行程におけるガス圧力の変化

第6圖 a 燃焼前後におけるガス圧力の変化

第6圖 c 燃焼前後におけるガス圧力変化の比較

第に遅くなる事に影響せられてゐるのではないかと思はれる。即ち燃料弁の開閉運動の平均速度は全荷重運轉 (速度 417 rev/mn) に於て 158 m/s であるのに対して無荷重運轉 (速度 428.7 rev/mn) に於て 217 m/s となつてゐる。

反對に燃料弁の開閉運動の平均速度は夫々 167 及び 196 m/s となつてゐる。なほ自動燃料弁は全開位置に於ても全開位置に於ても多少浮動してゐる事がオシログラフ上に現はれてゐる。

b. 点火遅れ——第9図 a, b, c, d, e は各荷重運轉における動作ガスの圧力 p kg/cm², 温度 T_g °K, 燃料油自然発火温度

第7圖 燃料弁の開閉とガス圧力の変化

第8圖 自動燃料弁の開閉

開閉運動を見るに弁が全開の位置に達するのは殆ど凡ての場合上部死点と一致して居り開き始めの時期に多少の差違がある。第8図中の a, b, c の曲線は夫々弁の開くに要する時間、全開位置に在る時間及び閉じる時間をクランク角度で示し a' b' 及び c' の曲線はこれ等の時間を秒で示したものである。水平軸にはサイクル毎に供給せられた燃料油の分量を以てした。b' 線が大体直線を爲しその延長が原点を通過する事実と各荷重運轉に於て燃料弁の揚程が殆ど一定である事実とから燃

T_s °K 及び自動燃料弁の開閉運動 F を示す。動作ガスの温度 T_g は筆者の考案せる線図により動作ガスを半完全ガスと看做し燃焼の進むにつれてモル数及び化学成分の変化するのを考慮に入れてその温度を決定したものである。燃料油自然発火温度 T_z は Tauß 及び Schulte の研究結果より算定した。第7図より自動燃料弁の開き始めより燃焼による圧力上昇の現はれる迄の時間を測定する事が出来る。これを点火遅れの時間 t として各荷重運転における値を図示すると第10図の曲線 t となる。今 T_g を燃料油の噴射せられる直前の温度とし噴射せられた燃料油の内最初に燃焼し始める油滴の重さを m , 表面積を F , 比熱を c , 空気と油滴との間の熱傳達係数を α とする時若し油滴が燃焼を始める迄にそ

の自然発火温度迄温度を高めそれがためには周囲に在る圧縮空気から熱が傳達によつて供給せられると看做すと次の関係

第9図 a 4/4 負荷

第9図 b 3/4 負荷

第9図 c 1/2 負荷

第9図 d 1/4 負荷

第9図 e 無負荷

昭和10年11月]

式が成立つ。

$$\frac{T_g - \frac{1}{2}(T_z + T_o)}{T_g - T_o} t = \frac{mc}{aF} = k$$

若し油滴の大きさが荷重の如何に拘らず一定せるものとすれば上式の k の値は一定して居らねばならぬ。実験の結果は第 10 図に示す如く k の値は略一定せる事を認めたのである。従つて上述の説は大体成立つのではないかと思はれるがこれ

量もこの寸法では単位表面積當り 1.016 倍に當つてゐる。従つてこの時迄にピストンへの傳熱量 564 cal は 751 cal に増加する。従つて H の値は 4,816 cal となり供給熱量 4,939 cal と比較すると 2.5% の不足を示すのみである。この結果より見て以上の計算によりて燃焼進捗度は大体決定し得たと思はれる。勿論圧力変化の示す様な細部に亘る特異点迄算定する事は出来ない。

第 10 図 点火遅れの時間、 t s

は引続いて実験して確定したいと思つてゐる。この他に渦流の激しい機関では回転速度が点火遅れの時間に著しく影響すると思はれるがこれも更に充分の実験的研究を重ねなければ確定しないと思ふ。

c. 燃焼進捗度——これは 4/4 荷重運轉の場合のみに就て計算した。先づ動作ガスの温度によつて燃焼始めの点から起算して内部エネルギーの増減を算定した。勿論燃焼と共に化学成分及びモル数の変化する事を考慮に入れた。第 11 図の U 曲線はこれを示す。次にガス圧力変化をフーリエ級数で表はしこれからクランク回転力の式を導きその積分の形でガスがピストンに與へた機械的仕事を計算した。これを W 曲線で表はす。一方動作ガスから気筒壁、ピストン及び気筒蓋へ傳達する放熱量を計算したがこれを図中 Q 曲線で表はす。この計算は全部筆者の「内燃機関における傳熱問題」の例題として報告してある。さてこの U 、 W 及び Q の總和に相當する熱量 H は燃料の燃焼によりて供給するものと看做される。これを第 11 図の $U+W+Q$ 曲線で表はす。この曲線は吐出弁の開く少し前クランク位置 $s=5.5$ の所で最大値に達してゐる。この時燃焼は完了した事を示すのであつてそれから先は動作ガス自身の内部エネルギーが機械仕事及び放熱量に費され居るのであつて $U+W+Q$ 曲線が下り気味になるのは動作ガスの一部が気筒外へ出始めた事を示してゐる。さてこの $s=5.5$ の時 H の値は 4,628 cal でありこれに對して気筒に供給せられた燃料油の燃焼熱は 4,939 cal に當るから兩者の差は約 6.3% に當る。然るにこの計算中ピストン頭部は平面円板と看做して傳熱量を算定してあるが實際は球面狀に凹みその表面積は 1.311 倍に増してゐる。一方平均傳熱

第 11 図 燃焼進捗度

第 12 図 熱効率及び効率比

d. 図示熱効率——図示熱効率は理想サイクルに對しては供給熱量の少い程良き効率を示す事になるが第 12 図

に示す η 曲線の如く實際の機関の図示熱効率も大体同様の傾向を示してゐる。これは前の c 項で機械的仕事 W の算定に用ひた積分法を機関の 1 サイクルに對して行つた図示馬力を求めこれを供給燃料油に相當する供給熱量で割つてその比を出したものである。併し機関の効率比を決定するための比較の標準たるべき理想サイクルとしては何れのサイクルが適當するかを調べるためにオット・サイクル、ディーゼルサイクル及び 2 段給熱サイクルの熱効率を半完全ガスたる空気サイクルに對して決定して見たがその結果を第 12 図に於て夫々 η_v 、 η_p 、及び η_{vp} の曲線で示す。即ち圧縮比を實際の機関と同一にし圧縮直前の圧力を 1 気圧、温度を 288°K とし斷熱圧縮後燃料による供給熱量に相當する熱量を等容又は等圧の許に供給する空気サイクルの熱効率である。2 段給熱サイクルは斷熱圧縮後の給熱を一部は等容の許に行ひその最高圧力が實際の機関からのインデケータ線図の示す最高圧力に等しくなつてから後残余の給熱を等圧の許に行ひ全部の給熱が燃焼による供給熱量に等しくなる様な空気サイクルと考へた。この結果を比較するに 2 段給熱サイクルがこの場合即ち無気噴射重油機関に適當する事を認める。最後にこの η_{vp} を基礎として實際の機関に對する効率比を算定したがこれを ϵ_{vp} 曲線として第 12 図に示す。然る時はこの実験に用ひた機関は理想的機関即ち効率 100% の理想に 68 乃至 78% 近づいてゐる事を知るのである。