



ディーゼル機関における表面蒸発燃焼に関する基礎実験：
加熱面温度と油滴ならびに油膜の蒸発の測定と算定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-05-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 赤木, 盈, 林, 重信 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3170

ディーゼル機関における表面蒸発 燃焼に関する基礎実験

加熱面温度と油滴ならびに油膜の蒸発の測定と算定

赤木 盈*・林 重信

A Study of Surface Combustion in Fuel Injection Engine (I) Fundamental Experiment in Evaporation of Fuel on Heated Surface

Mitsuru Akagi and Shigenobu Hayashi

Abstract

The "Diesel Knocking" often occurs on a Diesel engine, when much fuel is injected in a combustion chamber before the fuel is autoignited, especially in the case of a Diesel engine of direct injection type.

In this case the rate of pressure rising $dp/d\alpha$ in the combustion chamber becomes very high and the engine runs roughly. It was desirable long ago that the injected fuel did not contact with the surface of a combustion chamber wall.

Recently, however, Meurer (M.A.N) has made the engine which makes mixture gas by evaporating the injected fuel at the surface of the combustion chamber wall, causing slow combustion. He reports that such an engine runs smoothly. Here, attention must be given to the fact that the direction of fuel injection, the temperature of combustion chamber wall and velocity of the air in the combustion chamber sensitively affect the character of that engine.

As a first step, we have examined the relationship between the rate of evaporation for various kinds of fuel and the temperature of heated surface, and the relationship between the rate of reflection of injected fuel and nozzle directions.

By use of this relation we calculated the life time of fuel film on wall, reporting the results that have been obtained.

I. 緒 言

直接噴射式ディーゼル機関において、噴射燃料と燃焼室中の空気との混合の分布状態がその性能に大きく影響をもつので、燃焼室の形状の設計にあたり、噴霧の形状に注意し、燃焼室壁に噴霧があたると燃焼の中断を起し炭媒の蓄積の原因となるので、壁面にあたることを極力さけるよう努力して来た。また燃料の着火遅れ時間が大きい程着火までに燃焼室内に噴射される燃料は多くなり一部の燃料が着火すると同時に今まで噴射された燃料が燃焼を起し $dp/d\alpha$ は

* 玉川学園大学工学部教授

非常に大きくなってディゼルノックの原因となる。これに反し予燃焼室式機関等では噴射された燃料は一旦副室内で壁面にあたり気化して主燃焼室内に噴出しながら燃焼を続けるので比較的緩慢燃焼を行ないスムーズな運転が出来る。然し大型機関では設計上副室式にすることは多くの困難があり、これの対策としてM.A.N.社のMeurer氏が壁面での蒸発時間を与えることにより混合気の成生を緩やかに爆発させる方法として新しく表面蒸発方式を採用して良い成績を得たことを報告して居る。詳細なるデータは分らないが、この場合噴霧の壁に対する方向や壁面温度、または空気渦流の強さ方向等により性能に著しい影響を有すると考えられる。本実験では噴霧が壁面で油膜を型成した場合壁面温度により蒸発時間に何如なる影響をおよぼすかを基礎的な実験にて計算による推定を行なった。

II. 噴霧の蒸発と着火

燃焼室に噴射された燃料は霧化してその一部が蒸発をし着火に適する混合比の出来た部分から着火の核が出来て火焰を発生し、一度火焰が発生すれば未蒸発部分も急激に蒸発を起し火焰は広がって行くものである。油滴の高温空気中での蒸発および燃焼に関しては多くの報告がなされて居る。また噴油の何如なる部分が着火し易いかということに関しては一定の位置的関係は定め難いが、筆者の以前の実験によればボッシュの噴射装置でインパルススタータを使用した場合、ノズルの先端から20 mm以内では全く着火し得ず30 mmの距離で主噴霧の稜線の外側において着火率が一番大であった。普通のカム装置の場合はこの距離も大となると思われる。

壁面に燃料をフィルム状に噴射し、これが蒸発をして混合気を作る場合主噴霧が壁面に衝突する以前に着火すれば、燃焼の中断という現象を起し炭煤堆積を生ずるので好ましくないがその着火時期が膜の蒸発部分にて形成される混合気によるものが良いかどうかは問題であるが長尾教授の報告では蒸発部分の着火が主なものと思われる。

III. 実験装置と実験方法

本実験では壁面温度による油滴の蒸発時間をまず測定し、この熱伝達率より噴射燃料の壁面での油膜の蒸発時間を各種のノズル角度に対し推定せんとするもので2段階に分けて実験を行なった。

1) 油滴の蒸発時間の測定

油滴の皿面での蒸発時間に関しては棚沢教授が詳細に報告されて居るが、われわれの場合は金属壁面での蒸発を実験するため装置も同氏の場合より僅か異なる。

その装置を図-1に示す。皿aはアルミニウムで、これを電熱炉にて加熱し一定の温度に保つようにスライダックbにて電流を調整する。この油滴を8 mmカメラにて8 ppsの駒数

にて撮影すると同時に肉眼にて秒時計で測定した。油滴はピペットにて滴下させるが1回毎の僅かの誤差を生ずるので10滴の量を測り、これを30回繰り返かえて平均を求めその1/10を1滴の量とした。これより油滴が球形となるものとの仮定で平均径 d_0 を決定した。その値は1.69 mm である。壁温は皿の中心で決めた温度になる如く調整し、皿の一点にて熱電対をつけてこれを監視した。

2) 噴射燃料に関する測定

噴射された燃料が壁面に当たった場合、その速度により一部は反射して噴霧となって空气中に浮遊し、一部は壁面にフィルム状に附着するが、その1回の噴射量に対する反射または附着の割合はノズル角度とノズルから壁面までの距離により変る筈であるのでその関係を 図-2 のような装置にて測定した。

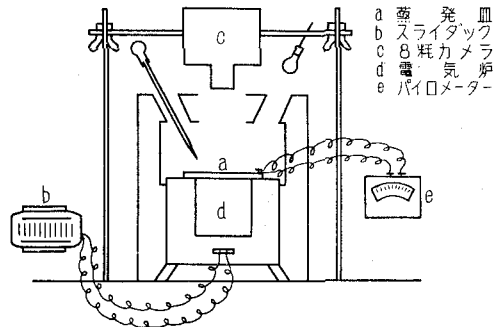


図-1 蒸発実験装置図

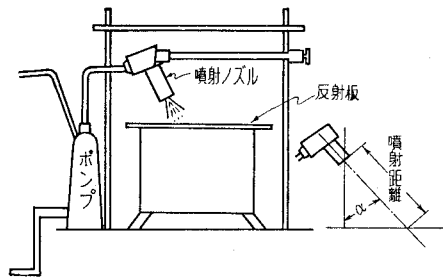


図-2 噴射実験装置図

使用噴射ポンプは Bosch A 型単筒用噴射ポンプで、ノズルは NDN4SD で、燃料は A 重油および軽油とし、1回の全噴射量は一定重量の脱脂綿に5回噴射して外部への飛散量が無いようにして秤量し、その1/5を1回の噴射量として30回のもの平均を取った。その値は約101 mg である。つぎに壁面に重量の既知の薬包紙を密着させこれに燃料を噴射させて5枚を秤量して平均して1回の附着量を測定した。同時に薬包紙に附着した燃料の面積を測定した。噴射燃料の噴出速度は噴射圧力をストレインゲージ圧力計で測り、圧力からの計算と、噴射を高速度カメラ 3,000 pps にて撮影し両者より推定した。

IV. 実験経過

1) 初めに油滴の蒸発時間を水、アルコール、水とアルコールの混合液、軽油、*n*-ヘプタン、*i*-オクタン、ベンゼン、重油につき測定した。8 mm カメラによる写真の例を写真1に示す。その結果を $t-\theta$ (ライフタイム-温度) 曲線にしたものが 図-3 である。同様な曲線は棚沢教授の実験結果にも得られて居る。

これによれば各燃料ともその沸点より僅か高温部に到るまで低温から温度が上昇するに従って t は急激に減少して居る。この最小の t を Max. boiling rate point (M.P.) と名づけられて居る。この点から再び t は増加し或る温度で最大となり再び減少する。この点を Leiden frost

point (L.P.) と称する。M.P. までは油滴はレンズ状を呈し対流による熱移動が行なわれる。M.P. を越えると核沸騰状態となり尚進んで膜沸騰状態となるが油滴の形状は不安定で、時により急激に細分して消失したり、球状をなしつつ運動を続けながら蒸発したりするもの等が出来て一定しない。特に壁面の粗さが大きい場合とか壁面に不純物が附着して居ると、そこで急激に油滴は拡がり瞬間に蒸発して消失することが多い。

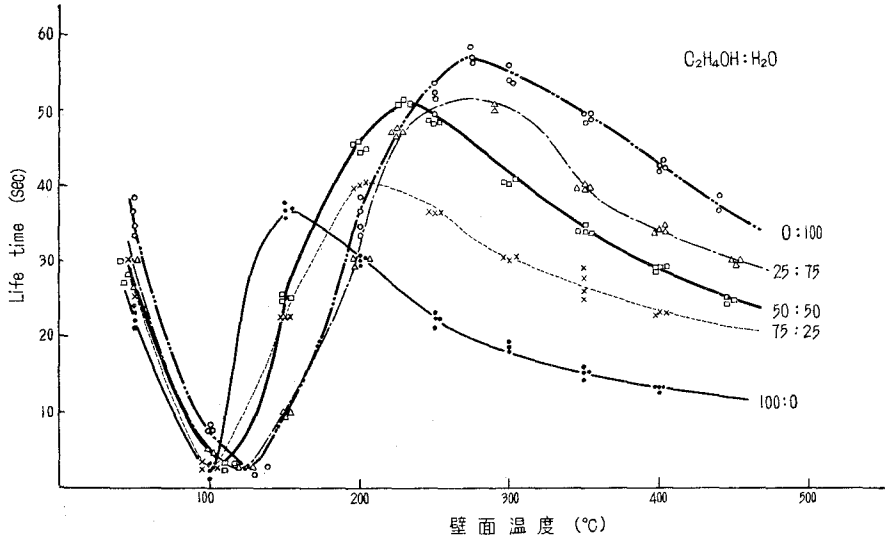


図-3a $t-\theta$ 曲線

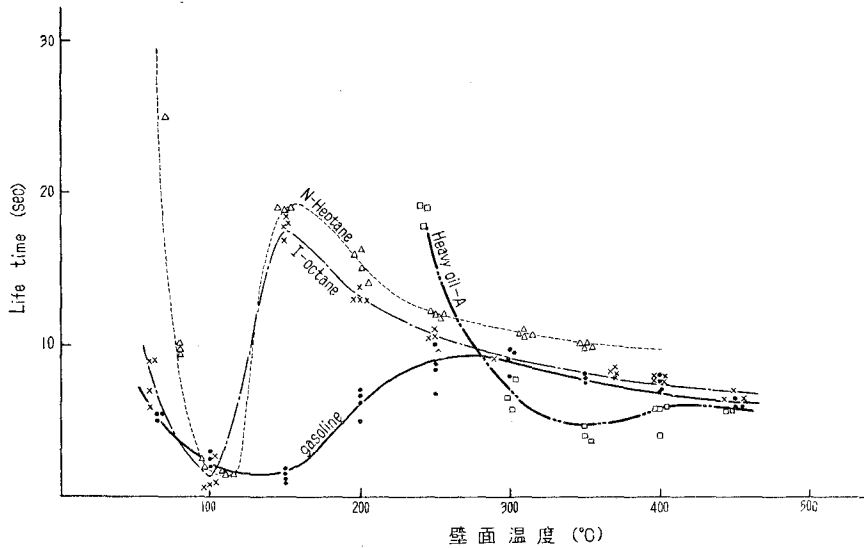


図-3b $t-\theta$ 曲線

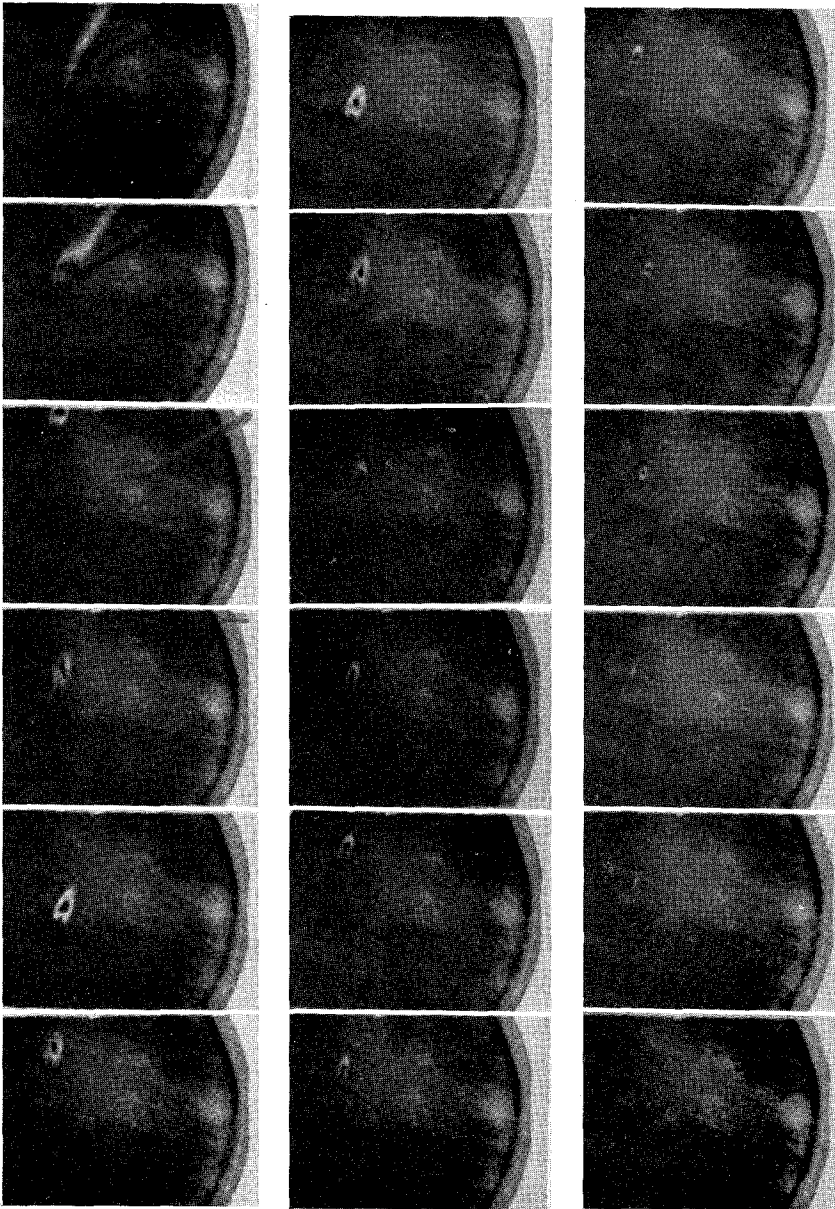
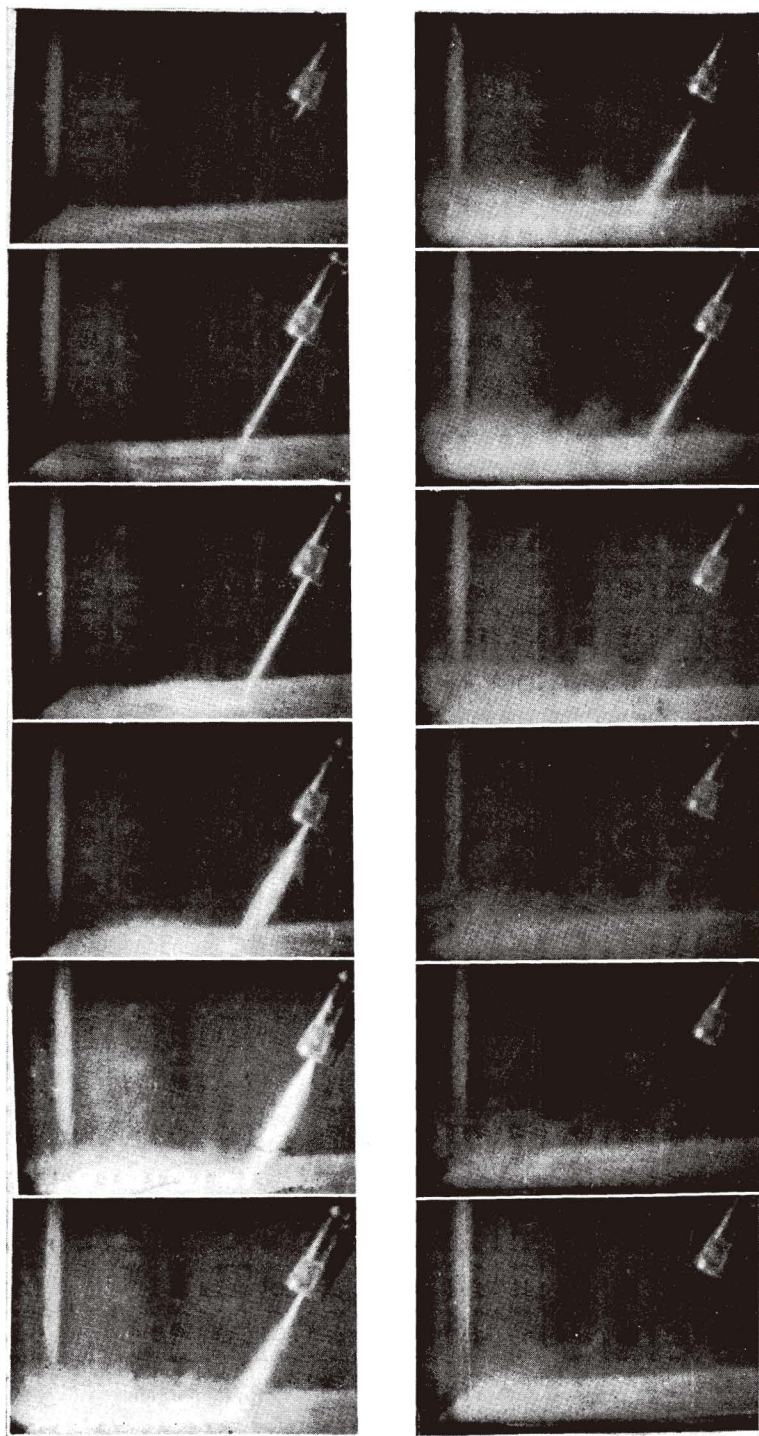


写真-1

これに反してL.P.以上では常に安定な球状をなし、滴下の条件によっては運動するが大体静止の状態を保ちつつ膜沸騰を起しながら蒸発して行く。

写真-1による油滴径との時間の関係を線図に示すと図-4のようになり、ほぼ径が時間に比例すると見ることが出来た。



写真一2

図-4 a

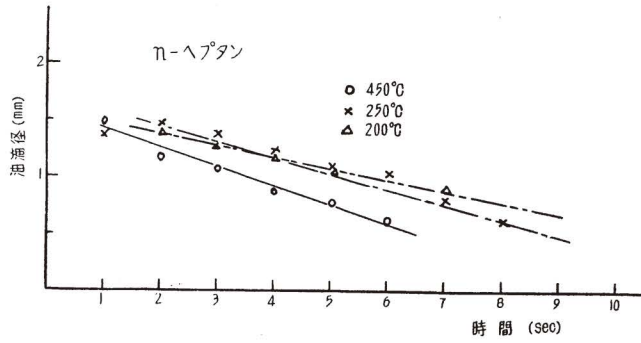


図-4 b

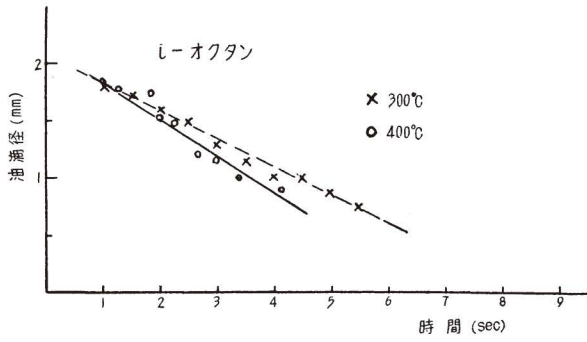


図-4 c

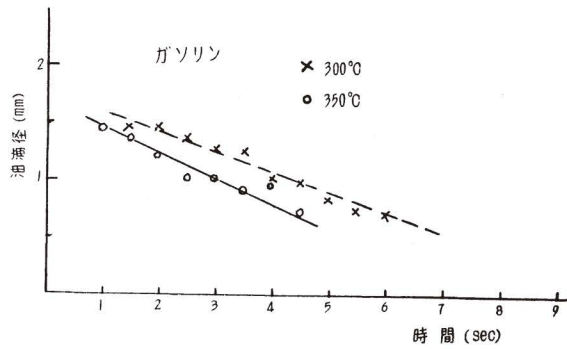
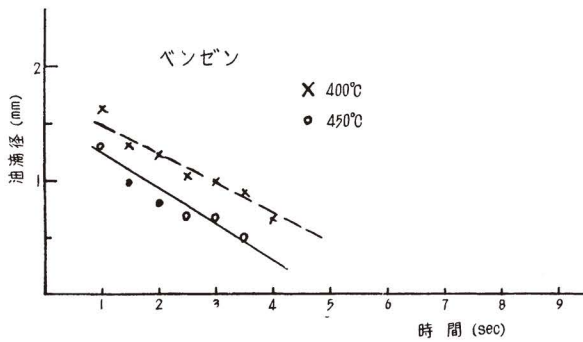


図-4 d



この場合の傾向として、純粹燃料の場合は M.P. と L.P. の間には明らかな差があるが混合燃料の場合、すなわち種々の炭素数を有する成分からなる石油系統の場合は重質になる程その両者の差異が明らかでなくなる。L.P. 以下では球状になり難く拡がる傾向にあり重油において最も甚しい。

2) 噴射燃料の壁面への附着率および反射率

平面壁に燃料を高速度であてると高速度で衝突するため、壁面にて燃料の間で干渉を起すけれども、一種の弾性反射を起して霧散する。他の部分はフィルム状に附着して壁面に残る。その附着した量を測定した。この場合空気の渦流は考えて居ない。ノズルから噴出して壁面に

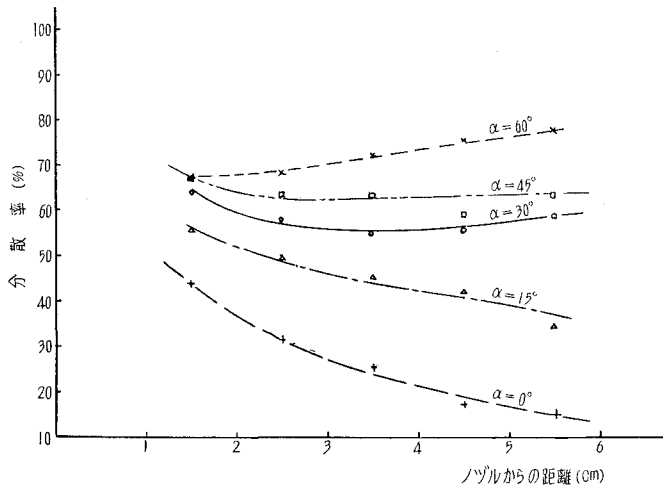


図-5a

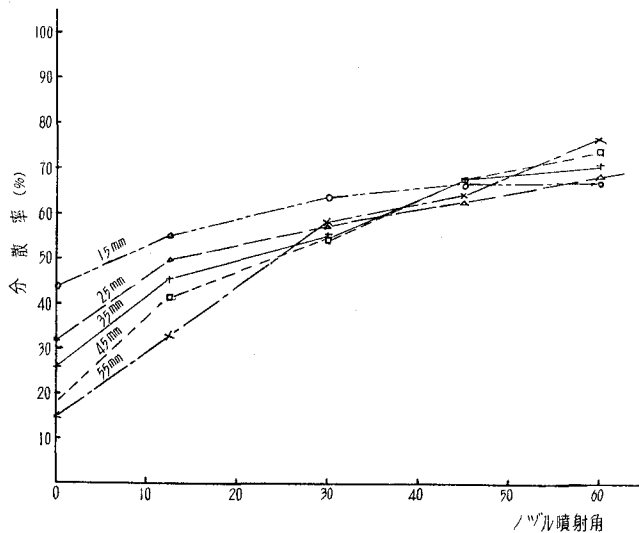


図-5b

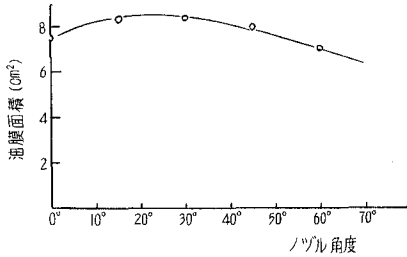


図-5c

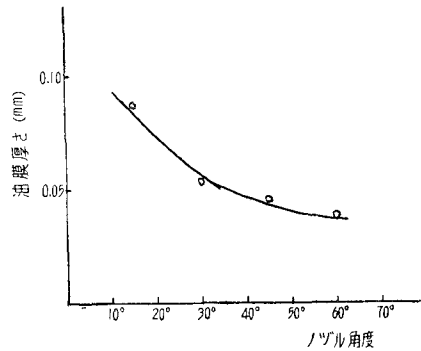


図-5d

衝突し霧化して行く様子を写真-2 に示して居る。

この結果を分散率に対しノズルからの距離と角度に関し点を求めると 図-5 の如くなる。

これから分る如く距離を一定にして噴射角度を変えて行くと分散率は増大して行くが距離が大きい程増大の割合が大きい。距離が小さい場合は角度が0° のときも分散率は大きいが角度の増大にてその増加は比較的少なく、装置の関係で実験し得なかつたが70°~80°あたりでは再び減少するものと思われる。距離が大きい時角度の増大で分散率が増加するのは壁面まで到達する以前に霧化して飛散するものが増大するものと考えられる。角度が小さい場合距離と共に分散率が減少するのは噴射の速度が減少するため反動力も減少するためであると考えられる。油膜面積及び油膜厚さは 図-5c, 図-5d の様になる。

V. 実験結果とその考察

1) 油滴の蒸発に対する平均熱伝達率

油滴への伝熱中 M.P. 以下では極部的な対流と考えられるが、これは今問題としないのでそれ以上について熱伝達率を計算して見る。この場合微小部分での多くの因子が作用する筈であるが、巨視的に一般の熱伝達の式を適用して平均熱伝達率を計算した。

$$\text{熱伝達の一般式 } dQ = \alpha \Delta\theta S dt \tag{1}$$

にて α は時間と共に変化しないものとし、 $\Delta\theta$ は壁温とその燃料の沸点の差とし面積 S は時間と共に変化するが、その時間的平均を取る。球の下半面を伝達面積とする。そうすれば (1) 式は

$$Q = \int_0^{t_1} \alpha \Delta\theta S_m dt = \alpha \Delta\theta S_m \int_0^{t_1} dt = \alpha \Delta\theta S_m t_1 \tag{2}$$

ここで t_1 は油滴のライフタイムで、油滴の表面積は径が時間に比例する故その時間的な平均表面積は

$$-\frac{d(D)}{dt} = C_1$$

$$D = -C_1t + C_2$$

$$t = 0 \text{ のとき } D = D_0$$

$$t = t_1 \text{ のとき } D = 0$$

$$\therefore D = D_0(1-t/t_1) \tag{3}$$

$$S_m = \frac{1}{2t_1} \int_0^{t_1} S dt = \frac{\pi D_0^2}{6} \tag{4}$$

以上の式より

$$\alpha = Q(T_w - T_d) S_m t_1 \tag{5}$$

この場合 Q は油滴の蒸発熱であるからその重量 m と蒸発潜熱 r が分ればその積として表わされ、純粹燃料では値を求めることが出来る。この様にして求めた熱伝達率を図に表わすと 図-6 のようになる。

L.P. 以上の温度では各燃料共一定に近づいて居る。またライフタイム曲線の如き変曲点も

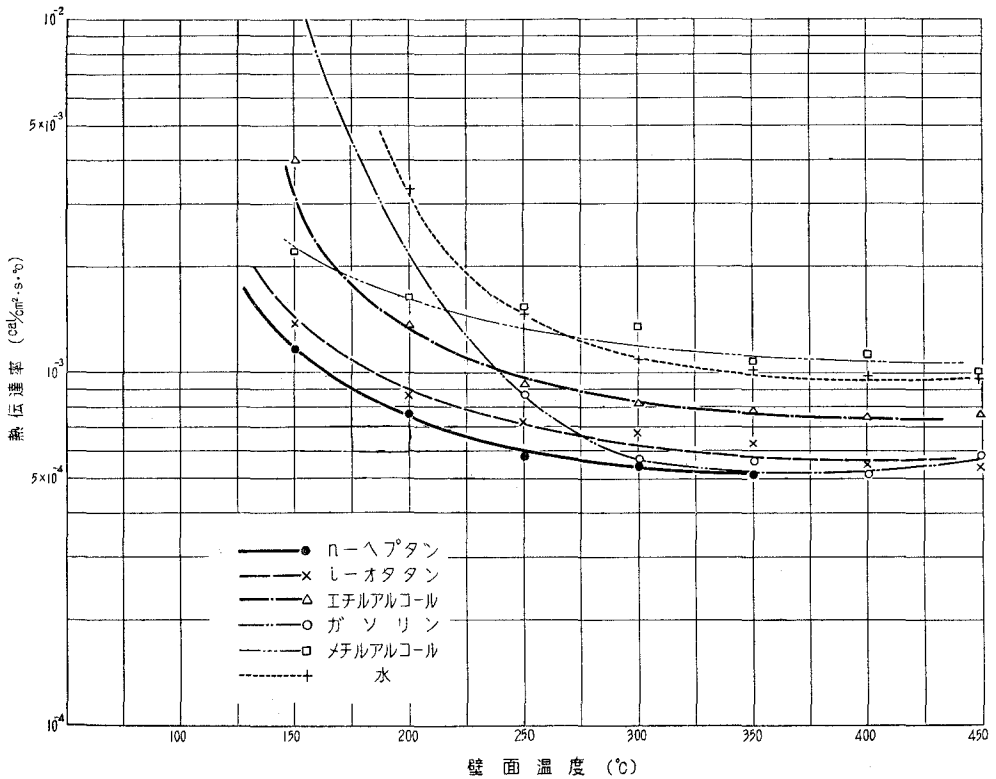


図-6

無い。この様な膜沸騰領域で熱伝達率に差があることは燃料の物理的性状の熱特性が異なるからであろう。しかしプラントル数の間には一定の関係は見出されなかった。

2) L.P. に関する考察

各燃料について M.P. および L.P. の各点が生ずる原因について沸騰膜の厚さと、輻射熱の二つに分けて考察した。微小膜中での対流は無視して、水とアルコールにつきその膜の厚さ δ を常に一定と仮定して両者に対する熱伝導の式

$$Q_a = \lambda_a (\theta - \theta_a) S \cdot t_a / \delta$$

$$Q_w = \lambda_w (\theta - \theta_w) S t_w / \delta$$

両式より

$$\frac{t_a}{t_w} = \frac{Q_a}{Q_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_a} \cdot \frac{\theta - \theta_w}{\theta - \theta_a}$$

この式から水とアルコールに対して t_a/t_w の値を温度に対し求めると 図-7 の実線のようになる。

これに対し実測値より求めたものは図中の×印の如くその計算値とは一致しない。したがってこの油膜の厚さが変わるものと仮定して、伝熱量から逆に油膜の厚さを計算して見る。すなわち

$$\delta = \frac{\lambda_w (t_1 - t_2) S \cdot t}{Q_w}$$

から δ の大きさを各壁温について求めてみると 図-8 のようになる。これからいけば油膜の厚さは温度と共に無限に上昇しなければならないことになるが油の蒸気膜の厚さは限度があると考えられる。

次に輻射による伝熱量を計算してみると輻射伝熱量の一般式

$$Q = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S \cdot t$$

ここで

C: 水の輻射係数 (3.3)

S: 受熱面積 (総面積 $\times \varphi$ とし φ は面積ファクター)

これより各温度にて輻射による伝熱量を計算すると 図-9 のようになる。伝熱面の面積係数により輻射熱量は差があるが、 $\varphi=0.5$ の場合は球の下半面のみを伝熱面と考えた場合に相当

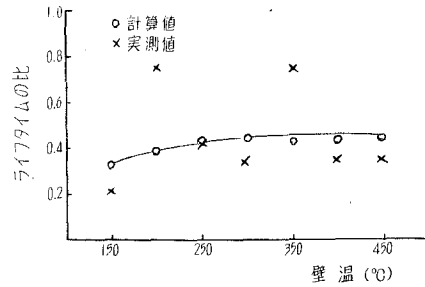


図-7

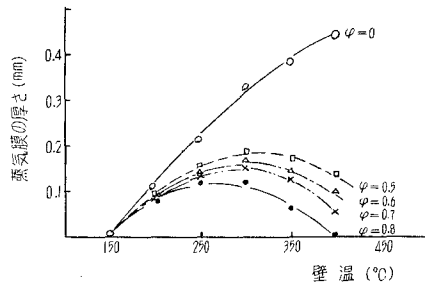


図-8

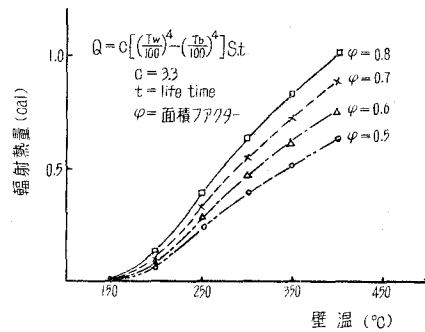


図-9

するが、実際の場合にはこれ以上と考えられるので、この値を差し引いた残を油膜の伝熱により伝わるものとすれば各φにつき油膜の厚さを計算すれば図-8の曲線群のようになる。

これにより分ることは、油膜の厚さの限界は0.15 mm から0.19 mm のものであると推定出来る。

3) 噴射油膜に関する考察

加熱面に燃料が噴射された場合一部は油膜を作って壁面で蒸発するが、本実験で用いた装置においては、噴霧が壁面で飛散するため写真測定も肉眼測定も困難を感じた。したがって油滴の場合の熱伝達率を適用出来るものと見て計算による蒸発時間の推定を行なって見た。また燃料は一般大型ディーゼル機関では重油を使用するので重油について行なったが、まえに述べた如く、複合燃料の蒸発熱、熱伝達率および沸点は一定して居ないので、数値的にこれを使用出来ないからそれ等の値は油膜のときも油滴のときも変らないと見て両者の場合の熱伝達の式

$$Q_d = \alpha_d \Delta T_a S_d t_d \quad (\text{油滴に対するもの})$$

$$Q_f = \alpha_f T_f S_f t \quad (\text{油膜に対するもの})$$

にて両者の比

$$t = t_d \frac{Q_f}{Q_d} \cdot \frac{S_d}{S_f}$$

ここで $\alpha_d \Delta T_a = \alpha_f T_f$ とし

$$Q_f = m_f \cdot r \quad Q_d = m_d \cdot r \quad (r \text{ は蒸発熱, } m \text{ は重量})$$

$$t = t_d \frac{m_f}{m_d} \cdot \frac{S_d}{S_f} = \frac{m_f}{S_f} \cdot \frac{S_d}{m_d}$$

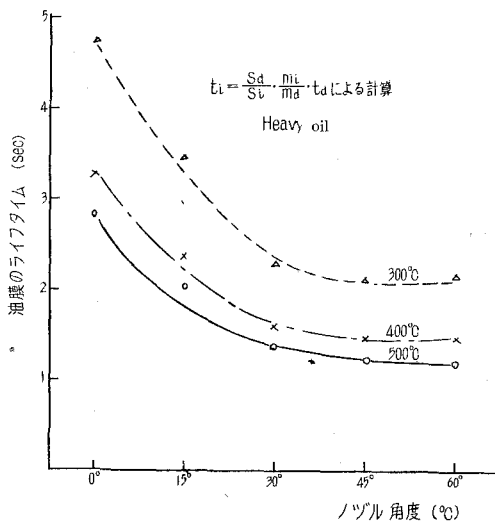


図-10

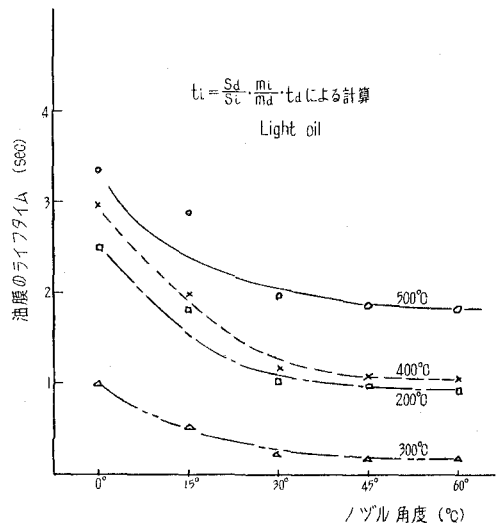


図-11

この式から噴射面での蒸発時間を求め各ノズル角に対し一定壁面温度でのライフタイムを求めると図-10, 図-11 のようになる。

これによればノズル角 30° までは角度による変化が大であるが、それを越した場合はほぼ一定となって来る。重油の場合温度が高い程短くなって居るが軽油の場合 300°C あたりで最も短くなって居る。一般的に軽油の場合の方が蒸発時間は短いことが予想される。

実際の機関では壁面の熱のみによる蒸発と一旦燃焼した火焰面からの熱伝達および熱輻射によるものが大きく影響して来る故蒸発時間の絶対値は大きく減少して来るであろう。

VI. 結 論

本実験では Meurer 燃焼の一部を受けもつ壁面での燃料の蒸発が如何なることに影響されるかの基本について測定したもので蒸発に対する壁温またはノズルの角度距離との関係を求めたもので、実際機関についてはもっと複雑である。つぎの段階で火焰が発した場合および空気渦流のある場合につき研究の予定であるが、現段階にて得られた結果からの結論を述べると

1) 加熱面で油滴が蒸発する際 M.P. 点および L.P. 点が現われるが純粋燃料程明瞭に認められ複合燃料は成分%により多い成分の形に近づく。したがって両点は燃料の沸点に関する点であることが明瞭になった。M.P. 点から温度が高くなるに従い油膜の厚さが影響すると考えられるがその厚さの限界は $0.15\sim 0.19\text{ mm}$ であるらしい。

2) L.P. 点の物理的意味として沸騰膜の熱伝達が大きく伝熱に支配するのと輻射によるものが支配する場合との境界域であると考えられる。また安定した蒸発を生ぜしめるためには L.P. 点以上において得られる。両点間の温度においては蒸発時間は表面の状態すなわち粗さ、極小部分の形、異物の附着等により影響を受ける。また油滴の形状変化は油滴径が時間に比例して減少すると見る方がより实际的であった。

3) 壁面への噴射燃料のフィルム状形成は同じ少ない噴射角度であれば一般に距離の遠いもの程附着率は大きくなるが、その角度が大きくなる程差が少なくなり 35° あたりから 50° までを境として距離の大きいもの程分散率が增大する。これは壁面に当たらないで飛散するものが増して来るからである。油膜厚さは燃料の物理的性質により、また噴射速度により異なるが重油の場合ほぼ 40μ 程度と考えられる。蒸発速度も油滴の場合より2倍ないし10倍程度大となる。

4) 壁面にあつた燃料は面上で互に干渉し合つて居るが噴射速度が速いものは写真で観測される如く、やはり霧状を呈するが油粒の大きさは不明であるが充分微粒粉でディーゼル燃焼には充分の細かさを持つて居る。

以上で単純なる壁面での燃料の蒸発過程の実験を行なつてその結果を検討したのであるが勿論この結果が直ちに実際機関に適合は出来ないが、加熱面での蒸発の機構の一部は分つた。

次の段階で火焰、圧力、渦流速度の問題と各温度での炭煤附着の問題が大きな課題となる。緩慢なる燃焼を起して如何なる時間に燃えつくすのが最適であるかはやはり実物機関での実験にまつ以外はない訳である。続けてこれ等の問題を解明しようと思つて居る。

最後に本実験に終始御教示頂いた北大の黒岩先生の御援助を謝すると共に本学学生宇田川淳、堀徳生、館修の諸君ならびに内燃機関実験室の早川友吉氏のたゆまぬ測定、装置加工の御援助に厚く御礼を申します。

(昭和37年3月31日受理)

文 献

- 1) J. S. Meurer: SAE Golden Anniversary Summer Meeting 1955, June 12-17, MTZ 1954, April, p. 105, 1955, März p. 63.
- 2) 赤木 盈: 広大工学部研究報告, Vol. 4, No. 2, p. 229~p. 234.
- 3) 小林清志: 日本機械学会論文集, Vol. 20, No. 100, p. 826~p. 843.
- 4) 長尾不二夫他: 日本機械学会前刷集, No. 45, p. 47~p. 59.
- 5) Tanazawa 他: 7th Symposium on combustion p. 509~p. 522.
- 6) Hussmann, A. W.: The Film Vaporization Combustor SAE, J. 1961, p. 5~63p. 574.
- 7) その他: 熱機関データブック, 化学便覧, 機械工学便覧, 内燃機関ハンドブック, International critical tables.