U.D.C. 621.43.019 536.46

# 高温面に接触する液粒の蒸発と燃焼に関する研究\*

Research on Evaporation and Combustion of a Drop Contacting with a Hot Surface.

> 田村善助\*\* Zensuke Tamura

## 内 容 梗 概

現在の内燃機関およびガス・タービンでは液体燃料を細かい噴霧として供給しているが,噴霧粒が吸気管壁 面などに接触した場合どのような挙動をとるかはまだ不明であって,これに関する研究で公表されたものはほ とんどない。

本論文は種々の粒径の燃料粒を凹レンズ状の金属面に落し、金属面の表面温度によって燃料粒が消失する時 間がどのように変るかを測定し、同時に消失するまでの液粒の状態を連続撮影して、この問題に解決を与えた ものである。

— 75 —

#### 1. 緒 言

ディーゼルエンジン、ガス・タービンの燃焼に関する研究は圧 力,温度などの間接的要素をたよる従来の皮相的研究をさらに一歩 進め, 噴射弁より微粒化された単一油粒に着目してこれの空間中に おける燃焼機構を理論的,実験的解析によって解明し,単一油粒の 燃焼法則を噴霧粒群の燃焼にまで拡大発展させ、噴射弁の噴射性能 を加味して燃焼室内の燃焼機構を究明しようという方向に向って多 くの研究者によって研究が行われ、多大の成果をおさめている。 これらの研究は噴射弁より噴射された油粒がほとんど空間中にお いて燃焼を完了するために、主として油粒の空間中における燃焼を 取扱っているが,噴射油粒の一部が内壁に達することも考えられ, 特に始動時または噴射圧の低い噴射弁においては噴射油粒が内壁に 達する確率が多くなってくる。しかし噴射油粒と内壁との相互作用 に関する研究は従来ほとんど行われていない。また最近イギリスの アームストロング・シドレイ社のガス・タービン用蒸発燃焼器(1)お よびドイツのMAN社のM式ディーゼルエンジン<sup>(2)</sup>のような蒸発燃 焼方式が出現しているが, 蒸発燃焼に関する基礎的研究でいまだ公 表されたものはほとんどない。

それゆえに筆者はこれらの問題を基本的に解決するために,高温 面に純粋燃料,実用燃料の液粒を接触させ,その液粒の蒸発および 燃焼現象を写真的に明らかにし,定量的に解析することによって, 従来不明とされていた燃料油粒と吸気管または燃焼室壁間の相互作 用を明らかにしたほか,アームストログ・シドレイ社のガス・ター ビン用蒸発燃焼器およびドイツの J. S. Meurer 氏の蒸発燃焼法の キイポイントを求めることができた<sup>(3)</sup>。

#### 2. 実験装置と実験方法

第1図が実験装置である。図中の8は凹面研摩したステレンス盤で、これを下からシルコニット発熱体15によって加熱し、液粒落下装置3,4,7により液粒を盤の中央に落下して蒸発または燃焼させる。液粒の寿命すなわち液粒が盤上に接触した瞬間から蒸発または燃焼を完了するまでの時間は、寿命が長い場合はストップ・ウォッ



- チで, 短い場合は16ミリ撮影機1,2,で測定する。
- 盤の表面温度は盤中に熱電対11,12,13,14の4本を等間隔にそう 入して外そう法で求める。
- 盤上の空気温度分布はおのおのの盤内温度分布に対してあらかじ め熱電対を上下にトラバースして求め,同時に盤上から5mm離れ
  - \* 学位論文抄録 \*\* 日立製作所日立研究所

第2図 写真撮影用実験装置

たところにある熱電対9によって空気温度を測定して盤内温度分 布,盤上空気温度分布,空気温度9との関係を線図として作り,実 験中は盤上空気温度分布の測定はそのつど行わず,盤内温度分布と 9の空気温度との測定より先に求めておいた線図から求める。 第2図は写真撮影用装置で,高温面として凹面ステンレス盤の代 評論

立



第3図 ベンゼンの寿命時間曲線

りに凹面石英板を使用し、その上に第1図と同様な液粒落下装置に よって液粒を落下し、下から光をあてて液粒の蒸発または燃焼状態 を16ミリ撮影機で連続的にシルエットとして撮影する装置であ る。

実験に使用した液体は純粋燃料のベンゼン,ノルマル・ヘプタン, イソ・オクタン,ノルマル・セタン,α-メチル・ナフタレン,エチ ル・アルコール,蒸留水,実用燃料のガソリン,軽油,A重油,潤 滑油のモビール・オイルの11種類である。

# 3. 純粋燃料の実験結果

と落下した液粒は着火する。 e' が着火点で, e'-f' 間は球状のまま 燃焼する球状燃焼過程である。着火すると火炎面の高温度の影響に よって球状蒸発の場合よりtが短くなり,球状蒸発曲線 d-e と球 状燃焼曲線 e'-f'とは e, e'において不連続になる。

**第4**図はベンゼン粒の各過程における写真である。時間 *t* は液粒 が盤面に接触した瞬間よりの時間で3個並んだ写真の中央のコマの 時間をあらわしている。△*t* は各コマの時間間隔である。

同図(a)は液膜蒸発過程の写真である。(b)は沸騰蒸発過程の写 真で,液膜中に気泡の発生および液膜自体の変形が認められる。 (c)は最大蒸発率点付近,(d)は遷移過程,(e)は球状蒸発過程の 写真である。(f)は球状燃焼過程,(g)は球状燃焼過程の火炎面の 写真で,火炎面は油粒から相当離れたところに存在することが認め られる。

第5図は各過程の現象をモデル的にあらわしたものである。

各純粋燃料は do のいかんにかかわらず θs によってそれぞれ液膜 蒸発過程,沸騰蒸発過程,遷移過程,球状蒸発過程,球状燃焼過程 の異なった蒸発および燃焼状態があり,各過程はそれぞれ沸点,最 大蒸発率点,ライデンフロスト点,着火点の4点によって区分され ている。

#### 3.2 液膜蒸発過程, 沸騰蒸発過程, 遷移過程

第6図 はベンゼン粒の初期粒径  $d_0$  をパラメータとして寿命時間  $t \in \theta_s$  と凝固点  $\theta_f$  との差 ( $\theta_s - \theta_f$ ) に対してプロットしたグラフ

### 3.1 純粋燃料の共通現象の定性的説明

第3図は初期粒径  $d_0=2.14 \text{ mm}$  のベンゼン粒の寿命時間  $t \geq \&$  の表面温度  $\theta_s$  との関係を表わしている。図から明らかなように t は  $\theta_s$  の変化によって極大値,極小値を示し,この  $t \sim \theta_s$  の関係は 絶対値はおのおの異なるが,粒径のいかんにかかわらずベンゼンの みならず,ノルマル・ヘプタン,イソ・オクタン,ノルマル・セタ ン,  $\alpha$ -メチル・ナフタレン, エチル・アルコール,水の各純粋燃料 について同じ傾向になる。それゆえに**第3**図により各純粋燃料の共 通現象を説明する。

 $\theta_s$ が液粒の沸点 b 以下の場合には落下した液粒は盤上で凸レンズ状の液膜に広がり、時間の経過とともに凸レンズ状のまま接触面積も液膜の厚みも比例的に減少して蒸発を完了する。この過程は図中のa-b間に相当し、液膜のまま蒸発が行われる液膜蒸発過程である。

 $\theta_s$ が沸点bに達すると液膜中に気泡が発生し、気泡の発生、成 長、崩潰とともに液膜自体にも変形が起る。 $\theta_s$ の上昇とともに気泡 の発生、成長、崩潰の過程ならびに液膜自体の変形が激しくなり、 盤との接触面積も小さくなってtは減少する。cに達すると落下し た液粒は瞬間的に蒸発し、tは極小になる。この極小点は抜山氏が 沸騰の熱伝達率測定の際に見出した最大蒸発率点 (maximum boiling rate point)に相当する<sup>(4)</sup>。b-c間においては液膜中で沸 騰しながら蒸発する沸騰蒸発過程である。

 $\theta_s$ が最大蒸発率点 c 以上に上昇すると落下した液粒は大,小数個の球に分裂し,寿命時間 t は長くなる。 $\theta_s$  の上昇にともない液粒の分裂する個数が少なくなり,ライデンフロスト点に達すると,落下した液粒は1個の球になって t が極大になる。c-d 間においては落下した液粒の分裂状態, t が不規則,不安定で,膜状蒸発から球状

である。各純粋燃料とも第6図のように寿命時間  $t \ge (\theta_s - \theta_T)$  は指数関数的関係があり、液膜蒸発過程の寿命時間を  $t_1$ 、沸騰蒸発過程の寿命時間を  $t_2 \ge \tau$ れば、 $t_1$ 、 $t_2$ はそれぞれ次の実験式であらわすことができる。

ここに θ<sub>b</sub>: 沸点 (°C) θ<sub>m</sub>: 最大蒸発率点 (°C)

*m*, *n*: 定数

 $k_b$ は  $d_o = 1$  mm で高温面の表面温度  $\theta_s$  が  $\theta_b$ になった時の寿命 時間,  $k_m$ は  $d_o = 1$  mm で高温面の表面温度  $\theta_s$  が  $\theta_m$ になった時の 寿命時間である。

純粋燃料の最大蒸発率点  $\theta_m$  は各燃料によって異なるが,

遷移過程の初期段階すなわち $\theta_s$  が $\theta_m$  より少し高い場合には **第**5 図(d)のように落下した液粒は大,小球に分かれ,小球は完全な球 状に近くなるが,大球は扁平な球になる。しかし $\theta_s$  が高くなりラ イデンフロスト点 $\theta_L$  近くなると,小球の分裂個数は減少し,大球 は完全な球状に近づいて行く。ベンゼン,アルコール,水,ヘプタ ン,オクタンのような揮発性物質は液粒の分裂の個数も多く,広範 囲に分裂するが,セタン, $\alpha$ -メチル・ナフタレンのような揮発分の 少ない液粒は分裂の個数も少なく,分裂する範囲もきわめて少な

# 蒸発に移る遷移過程である。

分な値となり、 $\theta_s$ と空気の温度  $\theta_a$  が着火に必要な温度に上昇する

# 3.3 球状蒸発過程,球状燃焼過程

V'o

---- 76 -----

球状蒸発過程においては落下した液粒が蒸発しきるまでに3段階 の異なった現象を示す。第1段階は落下した液粒が盤面への衝撃と 自重によって落下直後は平たい液膜になり,その時高温面から急激 に熱を受けて蒸気を発生し,縦軸の長いだ円体となり次は横軸の長 いだ円体,次はまた縦軸の長いだ円体という順序で変化する過渡期



m







(1) t=0.44 秒

(2) t = 0.69秒

(3) t =2.8 秒



(4) t=0.97秒  $d_o = 2.56$ mm,  $\theta_s = 128$ °C,  $\Delta t = 1 \swarrow 64$   $\Re$ (d) 遷移過程

(4) t=0.94 秒

1.

...

. ....

 $d_{\sigma}$  = 2.56mm,  $\theta_{s}$  = 115°C, △t = 1/64 秒 (c) 最大蒸発率点付近

(4) t=3.0 秒  $d_o$  = 2.56mm,  $\theta_s$  = 93°C, △t = 1/16 秒 (b) 沸騰蒸発過程

(4) t = 12 秒  $d_o = 2.56$  mm,  $\theta_s = 65^{\circ}$ C,  $\Delta t = 1/32$  (a) 液膜蒸発過程





(1) t =0.50秒



(2) t=1.4 秒



(3) t=3.0秒



(4) t=4.8秒 d = 2.56 mm,  $\theta_s = 550 \,^{\circ}$ C,  $\Delta t = 1/16 \,^{\circ}$  d = 2.56 mm,  $\theta_s = 850 \,^{\circ}$ C,  $\Delta t = 1/16 \,^{\circ}$  d = 2.56 mm,  $\theta_s = 850 \,^{\circ}$ C,  $\Delta t = 1/64 \,^{\circ}$ 



(f) 球状燃焼過程

(4) t=3.5 秒



(1) t=0.22 秒



(2) t = 0.31 秒



第4図 ベンゼン粒の蒸発および 燃焼の写真



(g) 火炎面の移動

間である。第2段階は液粒内の温度分布が均一になり、第1段階中	なって液粒が高温面に近づく,すると高温面からの熱伝達が多くな
の蒸発によって自重が減少するために完全な球状になって、高温面	って蒸発量が多くなり液粒が上に押上げられるということを繰返す
との間にできた薄い蒸気層の上にのったまま盤面上を動きまわる段	ので、液粒は自然対流の影響と相まって盤上を球状のまま跳躍する
階である。第3段階は時間の経過とともに液粒の重量が減少して蒸	段階である。
気層の厚さに比べて粒径が小さくなると、高温面からの熱伝達が低	第7図において第1段階は d <sup>2</sup> の変化が激しい区間,第2段階は
下し,そのために液粒からの蒸発量が減少する結果,蒸気層が薄く	こう配が一定になる区間, 第3段階はこう配がゆるやかになる区間

— 77 —







ための加工である。それゆえにもしも盤面が水平ならば当然第2段 階における d<sup>2</sup>の周期的変動は見られないであろう。

第7図から明らかなように、第2段階は第1段階、第3段階に比 べて現象の持続時間が長く, 球状蒸発過程は第2段階によって支配 されるものと見なすことができる。第2段階においてはこう配が一 定であるから

$$-\frac{d}{dt}(d^2) = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2$$

の関係が成立し、定数を Ce とすれば、

となる。ここに d1 は第2段階に入る直前の液粒の直径であり,  $C_e$  は蒸発の遅速をあらわす蒸発速度係数である。(4),(5)式から 球状蒸発過程は高温ガス中で石英の細線の先に液滴をつけてその液 滴を蒸発させた場合と同じ法則に従うものと見なすことができる。 しかし Ceの値は高温面からの熱伝達の影響を受けて高温ガス中の 値(5)より大きい。

第8図は球状燃焼過程における d<sup>2</sup>の時間的変化である。球状燃 焼過程の液粒の挙動は球状蒸発過程とまったく同じ挙動をとる。異 なるのは落下後若干の着火おくれがあって燃焼し, 高温の火炎面の 影響を受けて寿命時間が短くなる点のみである。燃焼は第4f図 (1)に見られるように着火に必要な混合比,温度になった燃料蒸気 の全拡散域にわたってまず着火し、その後は第4f図(2)、(3)、 (4), 第4g図に見られるように液粒から離れた火炎面でのみ燃焼 が行われ、拡散域では燃焼が行われない。

# 第6図 (表面温度 θs-凝固点 θf) に対する寿命時間

に相当している。 第7図において第2段階に周期的変動が見られるが、これは高温 面の凹面仕上によって写真の倍率が場所ごとに異なり、液粒がその 盤面上を移動するためである。高温面の凹面仕上は球状蒸発過程, 球状燃焼過程において液粒が盤面上からころがり落ちることを防ぐ 高温面に接触する液粒の蒸発と燃焼に関する研究











t = 0.23 秒





(5) t=0.72秒



605

球状燃焼過程においても球状蒸発過程と同様に

という関係が成立する。ここに d2 は着火直後の粒径であり、Cb は 燃焼の遅速をあらわす燃焼速度係数である。球状燃焼過程において も高温ガス中で石英の細線の先に液滴をつけて燃焼させた場合と同 じ法則に従い、Cbは高温ガス中の値(5)より高温面からの熱伝達の影 響を受けて大きな値になる。

#### 4. 実用燃料の実験結果

第9図は軽油の寿命時間曲線である。実用燃料の中,ガソリン, 軽油のような蒸留油には明確な沸点は存在しないが, 寿命時間曲線

蒸発率点 c, ライデンフロスト点 d, 着火点 e の 3 点によって区別 されているが、 c, dは蒸留油のように明確にはあらわれず, かえ ってcよりfのほうが寿命時間が長くなる。したがって残留油には 純粋燃料, 蒸留油のように瞬間的に蒸発が行われる最大蒸発率点は 存在しない。

第11図(a~b)はA重油粒が高温面に接触した場合の蒸発およ び燃焼の写真で、これらより揮発分がまず先に消失し、後からゆっ くり重質分が消失することが認められる。

# 5. 結

(1) 最大蒸発率点を使用すれば燃料の蒸発時間を短縮すること ができる。しかし使用すべき表面温度の範囲はせまく, 広い蒸発 面積を必要とする。

言

は第9図のように純粋燃料と同様な傾向を示す。	(2) 最大蒸発率点はターボジェット・エンジンの蒸発燃焼器に
第10図はA重油の寿命時間曲線である。A重油,モビール・オイ	も使用することができる。
ルのような残留油は蒸留油と異なり、揮発分と重質分とに分れて蒸	(3) ターボジェット・エンジンの燃焼室内筒壁の温度をライデ
発および燃焼する。すなわち残留油の油粒が高温面に接触するとま	ンフロスト点以上に保持すれば,内筒壁で燃料の凝縮または冷却
ず揮発分が先に消失し、その後重質分がゆっくり消失する。揮発分	が起らない。
の消失現象には液膜蒸発過程 a-c,遷移過程 c-d,球状蒸発過程	(4) 純粋燃料の蒸発および燃焼現象には液膜蒸発過程,沸膜蒸
d-e, 球状燃焼過程 e-fの4 過程があり, 各過程はそれぞれ最大	発過程,遷移過程,球状蒸発過程,球状燃焼過程のそれぞれ異な

\_\_\_\_\_ 79 \_\_\_\_\_

昭和35年5月

論

#### 第42卷第5号

	名称	分子式	比重	凝固点	沸点	最大蒸 発率点	ライデンフロスト	着火点	k <sub>b</sub>	m	k <sub>m</sub>		初期粒径	C <sub>e</sub> (m	m²/s)	C <sub>b</sub> (m	$m^2/s)$
			$\gamma(kg/m^3)$	$\left  \theta_{f}(^{\circ}C) \right $	$\left \theta_{b}(^{\circ}C)\right \theta_{m}(^{\circ}C)$	$\theta_{m}(^{\circ}C)$	点 	$\theta_i(^{\circ}C)$	mm <sup>1.5</sup> )	111	(S/ mm <sup>1.5</sup> )		(mm)	$\theta_{\rm s} = 450^{\circ} {\rm C}$	$\theta_{\rm s} = 700^{\circ}{\rm C}$	$\theta_{\rm s} = 900^{\circ}{\rm C}$	$\theta_s = 1,070^{\circ}C$
1	ベンゼン	СвНв	880	5.5	80.2	118	195	840	2.12	2.3	0.13	6.9	2.56	1.0	1.6	2.0	2.7
2	n- ヘ プ タ ン	C7H18	683	-90.6	98.4	134	182	738	1.75	5.2	0.13	22.6	2.52	1.5	2.5	3.4	4.7
3	iso-オクタン	CsH18	696	-108.0	99.0	132	184	800	1.56	6.0	0.12	23.3	2.50	1.5	2.5	4.2	5.2
4	n-セタン	C18H34	774	20.0	288.0	327	380	720	1.33	4.9	0.17	17.3	2.59	1.4	2.4	3.5	4.9
5	α-メチル- ナフタレン	$C_{10}H_7 \bullet CH_3$	1,025	-22.0	243.0	310	420	852	2.06	5.8	0.15	16.0	2.60	1.2	1.8	2.2	2.7
6	エ チ ル・アルコール	C2H5•0H	789	-115.0	78.3	117	185	800	2.77	6.4	0.16	15.3	2.98	0.8	1.1	1.7	2.0
7	水	H20	1,000	0	100.0	148	302		7.40	4.0	0.14	8.2	3.28	0.3	0.4		
8	モータ・ガソリン		756			190	300	805					2.57	1.2	1.7	3.0	3.6
9	軽 油		830			352	470	735					2.58	1.4	2.4	2.9	3.3
10	A 重 油		860			570	645	746									
11	モビール・オイル		941	~		550	650	735									

第1表 液粒が高温面に接触したときの蒸発および燃焼特性

った5過程があり、それらは沸点、最大蒸発率点、ライデンフロ スト点,着火点によって区分される。最大蒸発率点以上では(1), (2)式の関係が成立し、球状蒸発過程、球状燃焼過程においては (4),(6)式の関係が成立する。

(5) 蒸溜油においては明確な沸点が存在しないが、純粋燃料と 同様な傾向をもつ蒸発および燃焼現象を示す。

(6) 残溜油は揮発分と重質分とに分れて消失するという特殊な 蒸発および燃焼現象を示し、 Meuer 方式または蒸発燃焼器には 使用することができない。

(7)第1表に各燃料の蒸発および燃焼特性を一括して示す。

終りに臨み,本研究に対して懇切なご指導を賜り,実験に多大の 便宜を惜しまれなかった東北大学棚沢泰教授に深甚の謝意を表わ す。

#### 考 参 文 献

- (1) W. D. Pouchot and J. R. Hamm: Trans. ASME, 76 801 (1954)
- (2) P. H. Schweitzer: Autom, Ind., 52 (Aug. 1954)
- (3) Z. Tamura and Y. Tanasawa: 7th Symposium on Combustion, 509 (1958)
- (4) 抜山: 機械学会誌, 37 367 (昭9)
- (5) 小林: 機械学会論文集, 20 837 (昭29)



日立製作所社員社外講演一覧表

(202)

(第64頁より続く)

(昭和34年8月受付分)

講 演 月 日	主 催 者 名	演	題	所 属	氏	名
34.11. 7~ 8	電気学会東京支部	アナログ・ディジタル 併	用形経済負荷配分装置	国分工場	静 間 川 井	敏 男 晴 雄
	1179-1178 83924 24 1 24 1 24 1 24 1 24			関 西 電 力 日立研究所	吉 野河 竹	宗次郎 好 一
34.11. $7 \sim 8$	電気学会東京支部	400 kV 結 合 コ ン デ	ンサ形計器用変圧器	国分工場	浅 野	次 夫
34.11. $7 \sim 8$	電気学会東京支部	エレベータの	電 子 装 置 制 御	国分工場	石 塚 宮 尾	泰 司 英 夫
34.11. $7 \sim 8$	電気学会東京支部	日立制弧遮電器	の 特殊 動 作 責務性能	国分工場	加藤 益 田	保 照 之 一
34.11. $7 \sim 8$	電気学会東京支部	中性点そう入負荷時	タップ切換変圧器の保護	国分工場	桜 木 奥 山	義 祐 賢 一
34.10.2	電気学会放電専門 委員会放電研究 グ ループ	電極端部表面 =	ロナの防止について	絶縁物工場	小川	省 郎
34.10. 8~12	日本物理学会	硫酸グリシンの	鋸歯状波履歴特性	中央研究所	古 畑	芳 男
34.10.9	日本物理学会	GeおよびSiの新	吉晶成長について	中央研究所	伴 野	正美
34.11. 3~ 6	日本金属学会	フェライト中のう	遊離酸化亜鉛の定量	中央研究所	北川柴田	公則夫
34.11. 5	日本金属学会	ゲルマニウム 単結晶の格	子欠陥の 生成機構 について	中央研究所	伴 野	正 美
34.11. $3 \sim 6$	日本金属学会	白鋳鉄の機械	的性質(補足実験)	中央研究所	福 元	→ 郎
34.11. $3 \sim 6$	日本金属学会	Mi 白 鋳 鉄 および NiCi	r 白 鋳 鉄 の 第 一 段 黒 鉛 化	中央研究所	福 元	一 郎
34.11. $3 \sim 5$	日本金属学会	マリアブルの	内 部 摩 擦 的 研 究	中央研究所	佐 藤 大 原	喜 久 治 秀 晴
04 11 0 5				深川工場	江 上	種 一
34.11. 3~ 5	日本金属学会	合 燐 焼 結 鉄	の 研 究 (第2報)	日立研究所	竹 内 黒 沢	久 端 昭
34.11. $3 \sim 5$	日本金属学会	冷間引抜加工を加	1 えた u の 熱 膨 脹 特 性	日立研究所	小 野 添 野	健 二 浩
34. 9.8	日本機械学会	火力発電プラントの	水質試験とその解析例	日立研究所	川島	夏樹
35. 2 9	日本機械学会鋳造 部門委員会	鋳 物 の 超	音 波 探 傷 法	水戸工場	驚 山	重 也

---- 80 -----