

# 沸点の異なる燃料を混合した場合の 蒸発現象— I \*

2つの単一成分の炭化水素を混合した場合

森 下 晋 一

Evaporating phenomena of Mixtures Composed of Various  
Fuel oils with Different Boiling Points—I  
Case of Mixture Composed of Two Kinds of  
Simple Hydrocarbons

By

Shin-ichi MORISHITA

Evaporating phenomena of fuel oil produce a strong effect on the process of burning. They have been generally investigated by using a simple substance, not a compound substance. But there are methods of blending various kinds of fuel oils to facilitate their combustion. The present paper examines the evaporating phenomena of a mixture of  $n\text{-C}_7$  and  $n\text{-C}_{16}$  with different boiling points respectively. The results of the experiment are: 1. The mixture shows the plural phenomena on a metal plate heated at a lower temperature than one at which simple hydrocarbon evaporates in the shortest life, and presents a striking contrast to the singular evaporation of either hydrocarbon. 2. When the content of  $n\text{-C}_7$  is more than twenty percent, a drop of the mixture begins to evaporate and float in the air at two temperatures. 3. Of those temperatures, the lower falls more and more with an increase of the content of  $n\text{-C}_7$ , while the higher is constant whether the mixture contains a high percentage of the hydrocarbon or not.

## 1. まえがき

近年、熱エネルギーの多様化と資源の有効利用が進められているなかで、燃料の燃焼を改善しようとする試みがなされている。

石油燃料についてみると、原油の蒸留残渣物に軽質油を混入したり、水を添加して乳化したり、超音波によるスラッジの微粒化などの方法が研究されている。この内、混合油の燃焼を支配するものには多くの因子が考えられるが、蒸発して可燃混合気となる過程の把握は重要である。

\* 水産大学校研究業績 第973号, 1983年1月20日受理。  
Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 973. Received Jan. 20, 1983.

一般に蒸発に関しては、加熱面上で液滴の蒸発時間と加熱面温度との関係が、着火に与える影響<sup>2)</sup>、ふん囲気温度や圧力の影響<sup>3)</sup>および蒸発形態が不安定となる領域<sup>4)</sup>における研究が多く、混合油を用いた研究は少ない。

そこで混合した場合の蒸発現象を明らかにするため、沸点の異なる  $n-C_7$  と  $n-C_{16}$  の 2 種類の単一成分の炭化水素を用いて混合比を変えた燃料油を作り、加熱板上における単一液滴の蒸発に関する実験を行った。

## 2. 実験装置

蒸発時間が極大となる加熱板温度、すなわちライデンフロスト点を含む広い温度範囲における蒸発現象を調べるため、加熱板の材質は酸化の少ないステンレス板を用いた。

Fig. 1 に全体装置の概略を示す。図中加熱板①はステンレス製 (SUS-403) で直径100mm、厚さ20mmであり、中央に直径40mm、深さ2mmの凹球面を設けている。これは液滴が球状となり跳って外方へ飛散するのを防ぐためである。液滴がこの凹球面に落下し蒸発する際に表面粗さが蒸発時間に影響を及ぼすのを防ぐため鏡面仕上げとした。

加熱板は下方より電気炉②で加熱し、温度調節は電圧を変えて行う。

凹球面中央の表面温度の測定は、厚さ方向に表面より2mmと7mmの位置に設けた2本のK熱電対(線径0.6mm)③により行う。

加熱板の上方は大気に開放されており空気流れによる影響を受けるため、周囲をガラス製の円筒④で囲っている。

燃料液滴は、落下前の液温を一定にするため、常に水道水が循環している冷却筒⑤の中に設けられた注射器⑥の、先端は直角にした注射針により滴下する。注射針先端から凹球面中央表面までの距離は落下液滴の分裂を考慮して10mmとした。冷却筒から加熱板方向に突出する針は、周囲より加熱されるので影響を少なくするため突出部の長さを5mmとした。

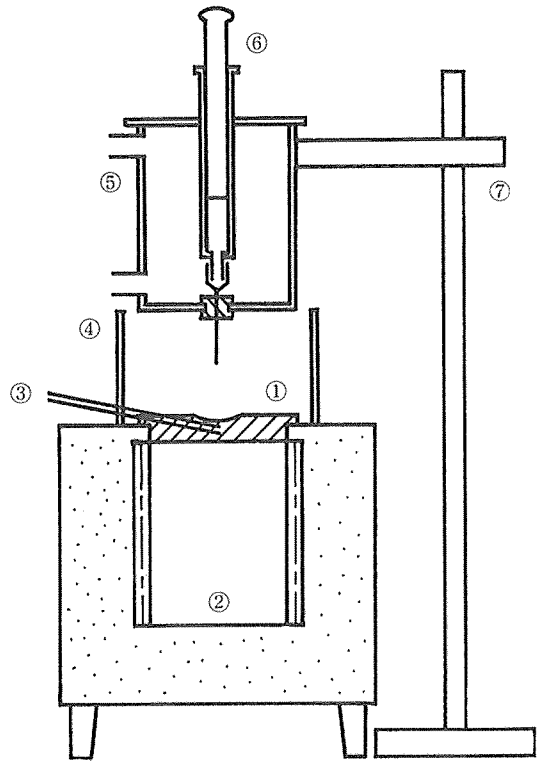


Fig. 1. Sketch of experimental apparatus.

- ①: Heating plate,                                 ⑤: Cooler,
- ②: Heater,   ⑥: Syringe,
- ③: Thermocouples,                             ⑦: Supporting stand.
- ④: Cylindrical protective glass,

## 3. 実験方法

### 3・1 試料

沸点を異にする2種類の単一成分の炭化水素として  $n$ -ヘプタン ( $n-C_7$ ) と  $n$ -ヘキサデカン ( $n-C_{16}$ ) を用いた。これらの性状を Table 1 に示す。

Table 1. Characteristics of Paraffinic Hydrocarbon

	$n-C_7$	$n-C_{16}$
Chemical formula	$CH_3 (CH_2)_5 CH_3$	$CH_3 (CH_2)_{14} CH_3$
Molecular weight	100. 19	226. 43
Specific gravity 15/4°C	0. 684	0. 775
Melting Point °C	-90	20
Boiling point °C	98. 4	287. 5
Surface tension (25°C) dyn/cm	19. 05	26. 10

試料には  $n-C_{16}$  に  $n-C_7$  を容量割合で 0% から 100% までの間を 10% ごとに混合した油と 1, 5, 95, および 99% の 15 種類の油を用いた。

### 3・2 液滴径

液滴径が蒸発時間に影響を及ぼすと考えられるため、直径の異なる 3 種類の注射針を用いて、液滴径およびその質量を次の測定方法で求めた。質量は容器に 50 滴落としその全質量を液滴数で除し、これを 10 回繰り返して、その平均値をとった。さらに初期液滴径は液滴を球状と仮定し質量から算出した。なお液滴径は注射筒のピストン速度により異なるので、液滴形成時間が一定になるよう努めた。

### 3・3 加熱板表面温度 $t_w$ およびふん囲気温度

$t_w$  は K 熱電対により 2 点の温度から求める。加熱板上のふん囲気温度は  $t_w$  が一定になった後、熱電対を用いて加熱板上 2.5mm から 30mm までの温度を求める。

### 3・4 蒸発時間 $\tau_e$ と蒸発の形態

$t_w$  が一定になった後、 $\tau_e$  は液滴が注射針先端を離れ加熱板に着地した瞬間より蒸発を完了する間の時間で、その測定をストップウォッチで行う。 $\tau_e$  の測定にあたり液滴温度<sup>3)</sup> ふん囲気温度および加熱板表面あらさ<sup>4)</sup> 等が  $\tau_e$  に影響を及ぼすと考えられるため、これらの条件が同一となるように努めた。そこで加熱板表面を各試料ごとにフェルトで磨いた。

蒸発形態の調査は目視による観察と 8 ミリ撮影で行う。この撮影は次の方法による。カメラを加熱板表面と 30 度をなす角度に設置し、ライトはカメラの向側から加熱板中央に向けて照射させ、撮影する。なおフィルム速度は 1 秒当たり 24 コまでである。

## 4. 実験結果

前記、3. 実験方法により求めた結果を次に示す。

$t_w$  が 390°C における加熱板上のふん囲気温度を求めたその結果を Fig. 2 に示す。また加熱板上 3mm の高さにおけるふん囲気温度を Fig. 3 に示す。

液滴径が  $\tau_e$  に与える影響を調べるため用いた 3 本の注射針の寸法並びにこの針で 3・2 で述べた測定方法により、 $n-C_{16}$  を落下した時の液滴径およびその質量を求めたその結果を Table 2 に示す。

$n-C_{16}$  を用い、加熱板に径の異なる 3 種類の液滴を落下させ、 $\tau_e$  と  $t_w$  の関係を求めた。その結果を Fig. 4 に示す。

ただし、 $\tau_e$  は 20 回の測定値の平均である。

混合比 0, 30, 70, 90 および 100% の燃料油における  $t_w$  と  $\tau_e$  との関係を求めた。その結果を Fig. 5 に示す。

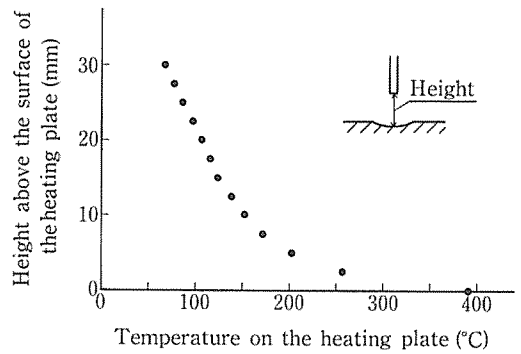


Fig. 2. Distribution of atmospheric temperature.

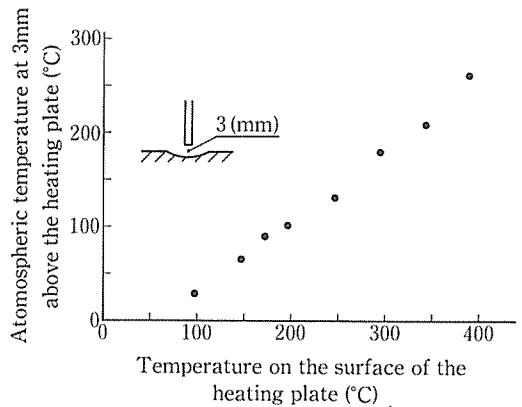
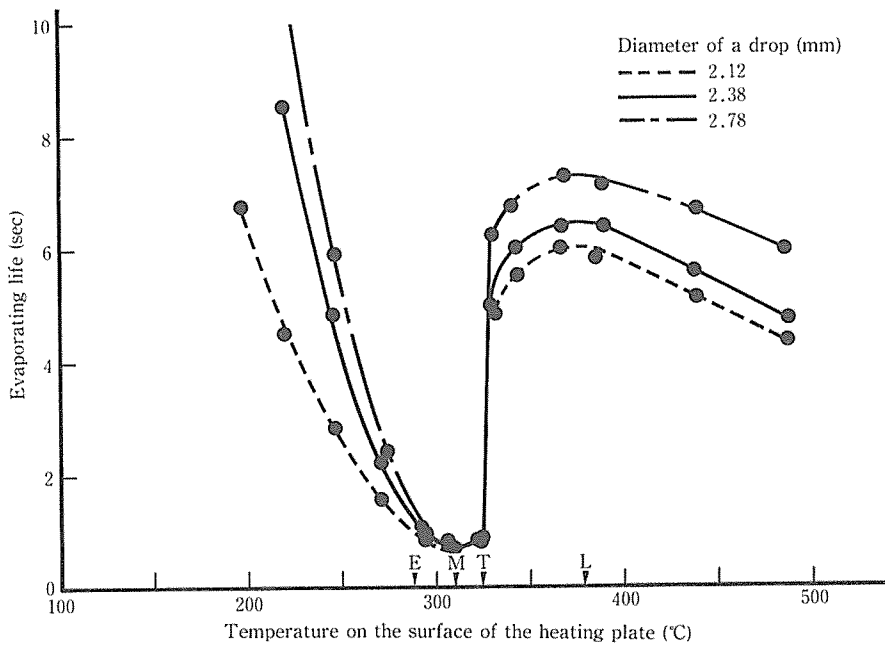
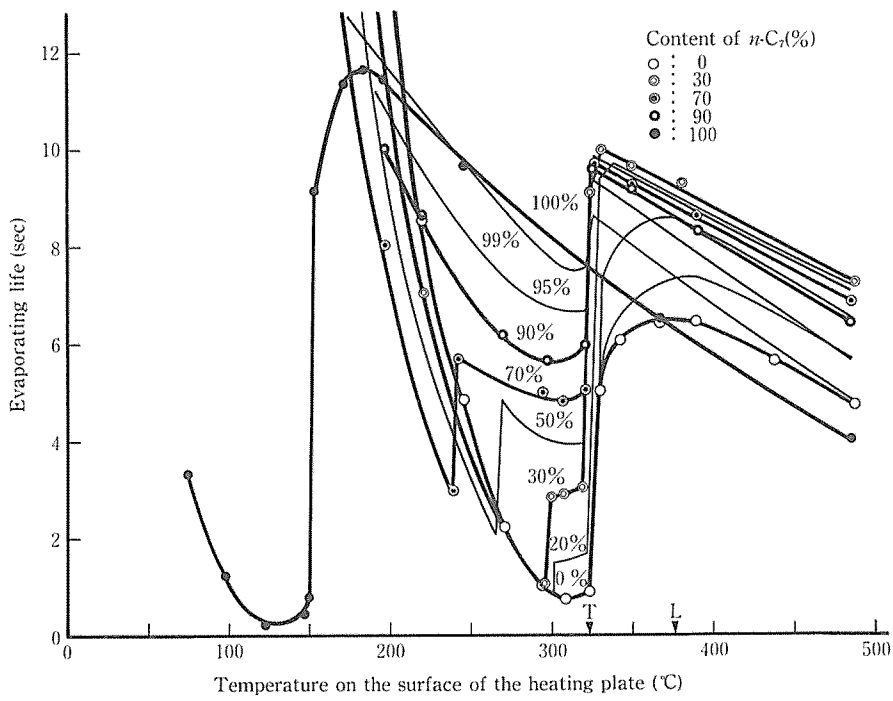


Fig. 3. Distribution of atmospheric temperature.

Table 2. Measure of the needle and the  $n-C_{16}$  drop in the initial stage

diameter of the needle		drop in the initial stage	
outside mm	inside mm	mass mg	diameter mm
0.31	0.13	3.86	2.12
0.57	0.35	5.46	2.38
1.07	0.75	8.70	2.78

Fig. 4. Evaporating curve of  $n\text{-C}_{16}$ .Fig. 5. Evaporating curve of  $n\text{-C}_7$ ,  $n\text{-C}_{16}$  and mixture with various ratios of their contents.

5. 検 討

5・1 単一成分の蒸発過程

単一成分の場合, Fig. 4 に示すように液滴の大きさが異なっても蒸発曲線は横S字を描いている。

この図において,  $t_w$  が低温度から  $\tau_e$  の極小となる加熱板温度M点(極小点)までの範囲では, 液滴径が大きくなるほど  $\tau_e$  は急激に減少する。 $t_w$  を高くして,  $\tau_e$  が極大になる加熱面温度L点(極大点)を過ぎると液滴径を大きくするほど  $\tau_e$  は大になる。M点から  $\tau_e$  が急増し始めるT点(遷移点)までは液滴径による差はない。このM点およびT点は310°C および323°C である。ライデンフロスト点であるL点は液滴径が大きくなるほど高温度となり,  $\tau_e$  は大になる。この様に液滴径が異なってもM点とT点の変化はなく蒸発曲線も同じ傾向を示す。これらのことから, 本実験の検討は一種類の注射針について行う。

液滴の加熱板上の蒸発形態は一般に大きく6つに分類される。それらの形態を Fig. 6 に示す。

また蒸発形態を調べるため 3・4 による方法で撮影した 8 ミリフィルムの一部を Fig. 7 に示す。

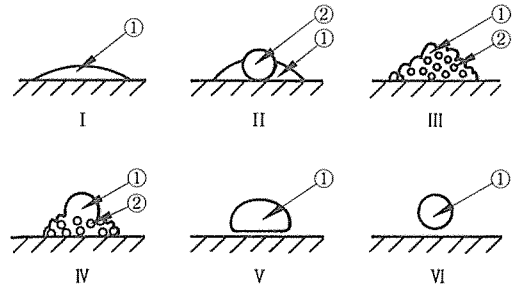
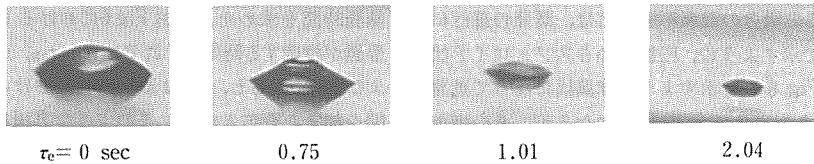


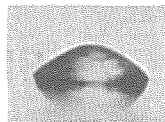
Fig. 6. Evaporating phase of a drop of fuel.

①: Liquid.  
②: Bubble.

Fig. 4 において  $t_w$  が液滴の沸騰点E以下の場合, Fig. 6 I に示すように落下直後液滴は凸レンズ状で, 時間と共に半径方向に広がりながら静かに蒸発する。 $t_w$  がE点に近いと Fig. 6 II に示すように落下直後, 液滴内に1個ないし数個の気泡が発生する。この過程を Fig. 7 (a) が示すように, この気泡は時間の経過と共に集合して1個になることもある。この場合, 液滴の蒸発は気泡を含んだまま続き破泡し



(a) Serial pictures showing the evaporating process of  $n-C_{10}$   $t_w = 270^\circ\text{C}$ .



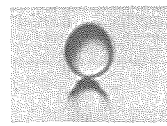
(b) Picture showing the evaporating phase III at Fig. 6.



(d) Picture showing the evaporating phase V at Fig. 6.



(c) Picture showing the evaporating phase IV at Fig. 6.



(e) Picture showing the evaporating phase VI at Fig. 6.

Fig. 7. Example of pictures showing the evaporating process.

て終る。この形態の生ずる温度範囲は液状蒸発領域とする。

$t_w$  がE点を超えてM点までは Fig. 6 III に示すように気泡の発生は盛んになり、ついに全体が泡立ち状態になる。このように  $t_w$  が高くなるほど液滴の蒸発速度は大きくなる。この蒸発形態は Fig. 7 (b) に示されているとおりである。

$t_w$  がM点を超えると泡立ちは増々激しくなり、Fig. 6 IV で示すように液滴は気泡で垂直方向に持ち上げられて、凸状のこぶを生ずる。さらに  $t_w$  を高くしてT点に近付くにつれ、こぶは左右に振れながら蒸発する。この蒸発形態は Fig. 7 (c) に示されている。M点からT点までの間、 $t_w$  が高いにもかかわらず  $\tau_e$  が長くなるのは、液滴と加熱板の界面に生じた気泡の層による伝熱量の減少と、液滴が垂直方向に持ち上げられることによる接触面積の減少による。これらの形態よりE点からT点までの範囲は沸騰蒸発領域とする。

$\tau_e$  はT点を超えると急激に大となる。その理由は次による。T点を超えた領域では液滴が一旦加熱板に接して沸騰蒸発するが、その後加熱板と液滴の間に生じた蒸気膜のクッションに支えられて浮上する。その状態で蒸発を続けると液滴体積の減少と共に「踊り」と呼ばれる現象を呈する。このようになると加熱板より液滴への熱伝達が悪くなるためである。この場合の液滴形態変化は、蒸発の進行につれて Fig. 6 V で示すように、円盤状からスフェロイド状に変わり、更に Fig. 6 VI で示すような球滴状になって蒸発を終る。更に  $t_w$  を上昇すると  $\tau_e$  は大になるが、その増加割合は小さくなり、 $t_w$  が約380°C を過ぎると  $\tau_e$  は逆に小さくなる。この  $\tau_e$  の極大となる  $t_w$  をL点とする。T点からL点までの範囲は遷移蒸発領域とする。Fig. 7 (d) および (e) に遷移蒸発領域で Fig. 6 の蒸発形態 V および VI が示されている。

$t_w$  がL点を超えて高くなると、落下後直ちに Fig. 6 V で示すような形態となり、液滴体積の減少と共にVIで示す形態に移行する。この間、液滴は加熱板上を踊りながら蒸発する。したがって  $t_w$  の上昇につれて踊りの現象が盛んになるため  $\tau_e$  は漸減する。L点以上の範囲を球滴状蒸発領域とする。

## 5・2 混合燃料油の蒸発過程

Fig. 5 に示した蒸発曲線において、混合比1%から10%までの燃料油で、 $t_w$  が遷移点までの範囲では混合比0%の蒸発曲線と一致しているが、混合比5%以上では  $t_w$  が遷移点より高い範囲で  $\tau_e$  は増大する。混合比20%とすれば  $t_w$

の上昇と共に  $\tau_e$  は減少するが、約301°C を過ぎると急激に  $\tau_e$  が増大している。約323°C になると再び急激に増大する。この急激に変化する温度の低い方を低温変曲点、高い方を高温変曲点とする。混合比を増すにつれて低温変曲点は低下し、 $\tau_e$  は増大する。ただし混合比90%を超えるとこの現象は現れない。また高温変曲点は混合比に関係なくほぼ同一であるが、 $\tau_e$  は混合比の増加に伴い増大する。

このように混合燃料の蒸発曲線は変曲点を2つ持つが、基本的には単一成分の場合と同様に横S字型を示している。また混合比20%から80%までの燃料油の蒸発曲線は同じ傾向を示すため、混合比30%、および70%を代表として Fig. 5 に示す。この図で混合比0%の蒸発曲線により、 $t_w$  をT点以下、T点からL点までおよびL点以上の3つに分けて蒸発現象を考察する。

5・2・1 T点以下について この温度範囲のうち低温変曲点以下の場合、混合燃料油の蒸発過程は、落下した液滴が激しく泡立った後、 $n-C_7$  の混合比を高めた液滴が蒸発を完了する。この蒸発過程は8ミリ撮影から Fig. 6 の蒸発形態IIIからII又はIへ移行していることが明らかである。液滴が Fig. 6 の蒸発形態I、IIおよびIIIで蒸発する各持続時間を調べるため、撮影したフィルムを用いて解析した。すなわち蒸発形態別にフィルムを分類し、そのこま数より蒸発時間を求めた。なお Fig. 6 におけるIからVIの各蒸発形態が持続する時間をそれぞれ  $\tau_{eI}$ 、 $\tau_{eII}$ 、 $\tau_{eIII}$ 、 $\tau_{eIV}$ 、 $\tau_{eV}$  および  $\tau_{eVI}$  とすると、 $\tau_e$  は蒸発過程における各形態の持続時間を加えたものとなる。このような方法で混合比30%燃料油における  $t_w$  が208°C から282°C の間の  $\tau_e$  を求めた。その結果を Fig. 8 に示す。この図から  $t_w$  を下げると  $\tau_e$  が大に

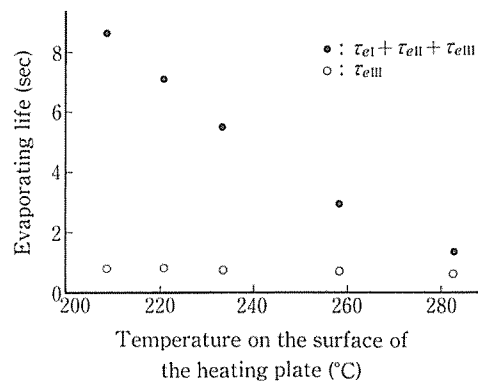


Fig. 8. Duration of each evaporating phase of the mixture when the content of  $n-C_7$  is 30%.

なるのは、 $t_w$ を変えても $\tau_{em}$ はほぼ一定であるので( $\tau_{ei} + \tau_{em}$ )が大になるためであることが明らかとなった。

この理由は、2成分混合液の蒸留に際して沸騰している液相から生ずる蒸気の組成は液相と比べてより低沸点成分に富む<sup>9)</sup>このことから蒸発が進むと液滴中の $n-C_{16}$ の混合比を増大し、その結果沸点は上昇する。そのため $t_w$ と沸点との差が小さくなるので蒸発速度が低下することによる。

混合比が20%以上になると球滴状蒸発を始める低温変曲点が見れ、さらに混合比を増せばこの変曲点は低温側へ移行し $n-C_7$ の遷移蒸発領域に近づく。 $t_w$ が $n-C_{16}$ の極小点以下であれば混合燃料油中の $n-C_{16}$ は加熱板に接して液状蒸発あるいは沸騰蒸発をしようとするが、 $n-C_7$ は球滴状蒸発領域であるから液滴を浮上させようとする。したがって混合比の多い燃料油ほど液滴が浮上する温度は低くなる。前述した混合比90%を超えると低温変曲点が見れない理由は、 $t_w$ が $n-C_7$ の遷移蒸発領域に近づくとき $n-C_7$ はFig. 6の蒸発形態IVを有するので蒸発速度は急激に大きくなり、液滴内部に多くの気泡を発生する。これが表面で破泡する際に液滴成分の表面張力の影響を受ける。すなわち表面張力の大きい $n-C_{16}$ のため気泡の逸散が抑えられ、液滴内部圧が高まる。その結果高い圧力で破裂するため多数の飛散液滴を生ずることになる。

低温変曲点から高温変曲点までの間はFig. 6蒸発形態IIIからVへ、再びIIIに戻りIIへの変化を示す。すなわち落下した液滴は加熱板へ短時間付着するが、沸騰蒸発の後、球滴状蒸発となり再び加熱板に接して沸騰蒸発または液状

蒸発の形態をとる。このような現象が起こるのは液滴の蒸発速度すなわち単位時間当たりの蒸発量の多少による。液滴を浮上させるだけの蒸気量を連続して発生させることが出来ればその形態で蒸発を終了するが、発生蒸気量が少なければ再び加熱板に付着して沸騰蒸発を行う。さらに蒸発形態Vでは蒸気膜を介して加熱するため、液滴の受熱量が減少するので、 $\tau_e$ は増大する。

低温変曲点から高温変曲点までの範囲で $\tau_e$ に影響を与えるものはFig. 6の各蒸発形態の持続時間である。撮影した8ミリフィルムの解析により混合比70%燃料油における $t_w$ と $\tau_e$ を求めた。その結果をFig. 9に示す。Fig. 10は $t_w$ が283.0°Cにおける混合比50%から100%までの場合を示す。

これらの図から、液滴が浮上して蒸発形態Vを保持する期間 $\tau_{ev}$ は、 $t_w$ の高い程、また混合比の多いもの程大になっている。これに続く( $\tau_{eII} + \tau_{eIII}$ )は加熱板に接しているため急激に蒸発するが、蒸発によって高沸点成分の混合比を高めているため、低温変曲点に近い $t_w$ では、大きくなる。(  $\tau_{eII} + \tau_{eIII}$ )は $t_w$ の上昇につれて減少し、ついに蒸発形態IIが消失して蒸発形態IIIで蒸発を終る。この蒸発形態IIが消失する温度が極小点である。

$t_w$ が極小点を超えると、再付着した液滴は激しく泡立ちながら垂直方向に伸び上がり凸状部を左右に振りながら蒸発する。このため加熱板との接触面積は狭くなり、 $t_w$ が高いにもかかわらず、 $\tau_e$ は大きくなる。

このように、低温変曲点から高温変曲点までの範囲では、

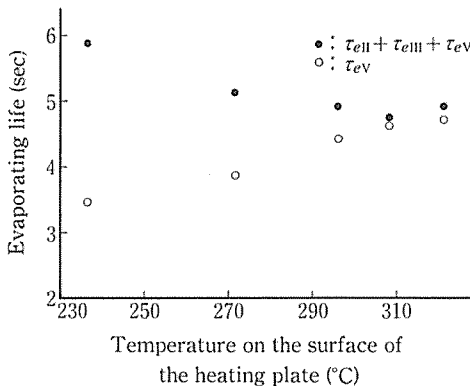


Fig. 9. Duration of each evaporating phase of the mixture when the content of  $n-C_7$  is 70%.

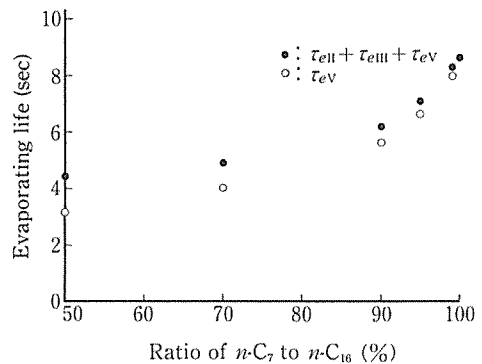


Fig. 10. Duration of each evaporating phase of the mixture when the content of  $n-C_7$  is 50 to 100%  $t_w = 283.0^\circ\text{C}$ .

$\tau_e$  に影響を及ぼすものは、再付着による液滴の蒸発および混合比である。

Fig. 5 において、 $\tau_e$  が極小となる  $t_w$  は 2 成分の混合比にかかわらずほぼ同一で、混合比 0% の極小点に等しい。この理由は、再付着した液滴は蒸発により高沸点成分の混合比を高め、蒸発現象が混合比 0% と同じ形態をとることによる。また極小点では混合比の多い程、 $\tau_{ev}$  が大きくなるので  $\tau_e$  は増大する。

5・2・2 T 点から L 点までについて 遷移蒸発領域における蒸発過程は Fig. 6 の III から順次 VI までの形態をとる。

$\tau_e$  に影響を及ぼすのはこれらの形態を持続する時間であるが、この領域の蒸発過程は形態の発生順序またはこれらの組み合わせが定まっていない。このため  $\tau_e$  の測定値が他の領域に比べてばらつく。このばらつきは次の理由による。

遷移蒸発領域において、液滴は加熱板上をバウンドと接地を繰り返しながら蒸発している<sup>6)</sup>ため、この振動数に同調するようじょう乱が加わればだいに振動は大きくなり、ついに加熱板に接する<sup>7)</sup>ことになる。また加熱板に付着すると  $t_w$  の降下<sup>4)</sup>により蒸発速度の低下となる。このような原因により測定された  $\tau_e$  のばらつきは大きくなる。

遷移蒸発領域では、混合比の大なる程低沸点成分が多いため蒸発速度が大きく液滴を浮上させ易いが  $\tau_e$  は小さい。一方混合比 30% までの燃料油では液滴の底面が不規則に輝く現象が現れる。これは液滴が自由振動周期をもって加熱板に接触を繰り返すので、底面の泡立ちによる<sup>6)</sup>ためである。このように混合比の小さい燃料油は蒸発速度は小さいが、加熱板に接し易いので  $t_w$  の影響を受けるため蒸発速度は大となり  $\tau_e$  は小さくなる。これらの中間の混合比では前述の理由により  $n-C_{16}$  と  $n-C_7$  の蒸発量の多少が  $\tau_e$  に影響する。また混合比にかかわらず液滴は蒸発に伴いだいに  $n-C_{16}$  の混合比を高め、液滴径も小さくなると高く飛び跳ねる。そのため伝熱量の減少により  $\tau_e$  は大きくなる。これらのことから  $\tau_e$  が最大となる混合比が存在し、本実験では 30% である。

5・2・3 L 点以上について 観察によると、球滴状蒸発領域における蒸発過程は蒸発形態 V と VI を交互に繰り返し、液滴は蒸発によりだいに体積を減すると急に垂直方向に飛び跳ねる。その高さは液滴径の数倍に及ぶが加熱板に接することはない。そのため厚い空気層を隔てて加熱されるため蒸発速度は小さい。また Fig. 2 および 3 に示されるように、加熱板上のふん囲気温度は表面から上へ離れるほど急激に低下し、 $t_w$  との差が大きくなるため更に蒸発速度を

低下することになる。

この領域で  $\tau_e$  に影響を与えるものは球滴の踊り現象と、蒸発による高沸点成分の割合を増加し蒸発速度を低下することである。

$t_w$  が 390.0°C における混合比と  $\tau_e$  の関係を Fig. 11 に示す。ただし  $\tau_e$  は  $\tau_{ev}$  と  $\tau_{evi}$  を加えたものである。この図から混合比にあまり関係なく、蒸発形態は V および VI のみであり  $\tau_{ev}$  と  $\tau_{evi}$  の比はほぼ一定で、 $\tau_e$  の 2/3 を  $\tau_{ev}$  が占めている。すなわち混合比にはあまり関係なく、 $t_w$  が一定ならば蒸発過程はほぼ同一であることが明らかとなった。

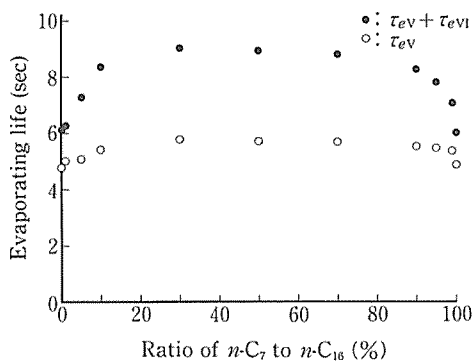


Fig. 11. Duration of each evaporating phase  
 $t_w = 390.0^\circ\text{C}$ .

## 6. まとめ

単一成分の  $n-C_{16}$  に沸点の異なる  $n-C_7$  を容積割合を変えて混合した燃料油を用い、加熱した金属板上で単一液滴の蒸発に関する実験を行い、次の結果を得た。

1. 加熱板温度と蒸発時間の関係において基本的な蒸発時間は横 S 字型曲線となり、その時間は極小値と極大値が存在する。
2. 蒸発形態は、横 S 字型曲線の極小点以下で単一成分は一つ、混合燃料油は複数である。
3. 混合比 20% 以上では液滴が加熱板より浮上するため、蒸発過程において形態を変える温度が 2 点存在する。その一つは混合比が高くなる程低温度に、他の一つは混合比に関係なく沸点の高い燃料油の遷移温度と一致する。
4. 混合燃料油のライデンフロスト点における蒸発時間は沸点の高い燃料油より大きく、本実験の試油では混合比 30% で最大となる。



## 文 献

- 1) 溝本雅彦・早野裕康・猪飼 茂：日本機械学会論文集，44-380，1366~1372 (昭53)。
- 2) 溝本雅彦・盛田明男・猪飼 茂：日本機械学会論文集，45-389，136~143 (昭54)。
- 3) 広安博之・角田敏一・千田達郎：日本機械学会論文集，39-328，3779~3785 (昭48)。
- 4) 小竹 進：日本機械学会論文集，36-287，1147~1152 (昭45)。
- 5) 小野宗三郎・長谷川繁夫・八木三郎：物理化学II，共立全書147，共立出版，東京，昭48，pp. 272~273。
- 6) 西尾茂文・平田 賢：日本機械学会論文集，44-380，1335~1344 (昭54)。
- 7) 梶昭次郎：日本機械学会論文集，39-328，3771~3777 (昭48)。