高温空気中における船用燃料油の単一液滴の 燃焼時間*

羽鳥 和夫**

Burning Time of Single Droplet of Marine Fuel Oils in the High-temperature Air

By Kazuo Hatori

This paper describes the experimental study on burning time of the suspended single droplet of fuel oils in the high temperature air under atmospheric pressure. The fuel oils used in the experiment were twelve marine fuel oils.

The results show that the burning time of single droplet is determined by the mass of droplet at ignition and the evaporation rate during burning, and it decreased under both lower and higher ambient temperature. Therefore, the burning time took the maximum value with the change of the ambient temperature. The mechanism of the burning process of these droplets was investigated.

The life time of droplet is influenced by the ignition delay rather than the burning time, and it decreased with the increase of ambient temperature.

1. 緒 言

近年、船用燃料油は低質化する傾向にあり、これに起因すると考えられる障害が発生している。このような燃焼油に起因する問題を解決するためには、その燃焼過程を解明することが重要であり、これまでも単一液滴を用いた基礎研究が行われてきた¹⁻¹⁰⁾。しかし、船用燃料油は多成分混合燃料であることから単一組成燃料の解析手法が適用できないため、その燃焼過程を十分に解明するには至っていない。

筆者は、船用燃料油が残渣油に軽質油を混合して出荷されることから、これらは基本的に両者の二成分混合燃料であるとの観点に立ち、これまでに高温空気中で単一液滴を燃焼させる手法を用いて混合燃料油の着火・燃焼過程や船用燃料油の着火過程について調べ^{11,12)}、次のようなことを明らか

にした。

液滴が高温空気中に入ると、最初、主に低沸点成分の軽質油が蒸発する。空気温度が高く、軽質油の燃料蒸気が十分であれば、液滴はこの燃料蒸気で着火する(ケースⅠ)。この燃料蒸気が着火に至る前に周囲に拡散した場合、液滴は後から蒸発する残渣油の燃料蒸気で着火する。この時、着火遅れは残渣油自体の着火遅れより大きくなる(ケースⅡ)。両者の境界に於いて、着火遅れは初期直径に対しステップ状に変化する。そして、着火遅れは初期直径が小さい範囲(ケースⅡ)で大きく、初期直径が大きい範囲(ケースⅠ)で小さい値を示す。また、燃焼時間は空気温度が高ければ、軽質油の混合割合が少ない範囲で減少することを示した。

本報告は、各種船用燃料油の単一液滴を大気圧下での高温静止空気中で燃焼させ、前報のケースⅠ、Ⅱで示された着火遅れと燃焼時間の関係や空気温度と燃焼時間の関係を調べた。また、 d^2 則が成立しない条件下ではみかけの d^2 値を用いて燃焼過程の考察を行った。

*原稿受付 平成12年10月31日
**正会員 船舶技術研究所 (三鷹市新川6-38-1)

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略を図1に示す。実験用の燃焼室は、加熱体からの輻射の影響を防ぐため、内径80mm、長さ200mmの炉心管を電気炉内に納めたものである。燃焼室の温度は液滴の燃焼時の影響を除くため、中心位置から水平に20mm離れたほぼ中心線上で測定し、各設定温度で一定値に制御した。液滴は、懸垂棒の先端に懸垂され、炉を移動することにより燃焼室の中央に保持される。炉の移動による懸垂棒の振動を防ぐため、それらの架台は分離して床に固定した。懸垂棒は直径0.5mmの石英棒を用いた。炉内に入った液滴は周囲の高温空気と炉壁からの輻射により加熱されるため、着火遅れは液滴が燃焼室の側壁内面を通過してから着火するまでの時間とした。液滴が側壁内面を通過する瞬間はフォトインタラプタにより検出した。この検出信号によりタイマーが動作し、時刻表示は液滴と同一画面に録画される。着火の瞬間は録画した画像上に輝炎が発生した時刻を用いた。燃焼時間は液滴が着火してから火炎が消滅するまでとした。液滴直径は、液滴を回転楕円体と仮定し、液滴の短径(d_h)と長径(d_v)から、 $d = (d_h^2 \times d_v)^{1/3}$ として求めた。短径と長径は録画した画像から測定した。

液滴の画像は読み取り精度の向上と現象の観察を容易にするため、長径が画面寸法の約30%まで拡大して撮影した。

C重油については、約313Kに保温しておいた燃

料油を所定量だけ懸垂棒の先端に付ける。液滴の初期温度を一定にするため、懸垂液滴の温度がほぼ室温となった後、炉を移動して液滴を加熱し燃焼させる。粘度の低い燃料は保温せずに使用した。実験中の液滴の挙動は、VTRで録画すると同時に、モニターで観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 使用燃料油 今回使用した12種類の燃料油の密度と動粘度を表1に示す。上段に示した燃料油AからIはC重油に相当する。下段は軽質油を示し、燃料油Lは燃料油JとKを1:1の割合で、Mは1:3の割合で混合した混合燃料油である。

表1で示した各燃料油の蒸留曲線は熱天秤を用いて昇温速度100℃/分で測定した。これらの結果は燃料油J~K、及びC重油を低沸点成分の割合で3種類に分け、それぞれを図2に示す。

3.2 単一液滴の燃焼時間 燃焼時間に及ぼす初期直径の影響を見るため、各燃料油について両者の関係を測定した。最初に、燃料油による燃焼時間の相違点を示すため、燃料油J、K、L、Aについて、初期直径と燃焼時間の関係を図3と4に示す。両図は代表的な挙動を示す空気温度850K、950K及び1100Kの結果について示し、横軸は初期直径の二乗値(d_0^2 値)で示した。

図3の燃料油Jの場合、全ての空気温度で、燃焼時間は d_0^2 値に比例して増加するが、その増加量は

表1 使用燃料油の密度と動粘度

燃料	密度 Kg/m ³ (288K)	動粘度 cSt(323K)
A	962.9	266.6
B	981.7	305.0
C	971.6	258.8
D	994.0	430.4
E	978.3	245.3
G	979.1	345.3
H	967.7	397.2
I	964.9	169.2
J	856.5	2.55
K	989.0	36.36
L	923.5	6.77
M	956.4	13.84

図1 実験装置の概略

図2 窒素ガス雰囲気中のTG曲線

空気温度が高くなるにつれて小さくなる。また、燃焼時間は空気温度が高くなるにつれて増加するが、空気温度950Kと1100Kを比較すると、その増加量は僅かである。

燃料油Kでは、空気温度850Kと950Kに於ける燃焼時間は燃料油Lと同様の傾向を示す。しかし、空気温度1100Kでは、 d_0^2 値に対する燃焼時間の増加量は他の空気温度に比べて小さい。これらの値を比較すると、空気温度1100Kの燃焼時間は d_0^2 値が小さければ空気温度950Kの値より大きいが、 d_0^2

値が大きいと850Kの値とほぼ等しい。

図4の燃料油Lでは、これまでに示した燃料油と異なり、空気温度850Kに於ける燃焼時間は d_0^2 値が2.2付近でステップ状に変化する。ここでは燃焼時間の変化を明確に示すため、図中に近似直線を加えた。

この現象は燃料油Lが燃料油JとKの混合燃料油であり、 d_0^2 値の大きさにより着火過程が異なることに起因する。つまり、液滴は d_0^2 値が大きければ燃料油Jの燃料蒸気で着火し、 d_0^2 値が小さければ燃料油Kの燃料蒸気で着火する。燃焼時間の変化はこのような着火過程の違いに対応しており、前報¹²⁾と同様にCase I, Case IIで示した。

着火過程が同じならば、燃焼時間は他の燃料油と同様に d_0^2 値に比例して増加する。また、空気温度1100Kの燃焼時間を950Kの値と比較すると、その値は d_0^2 値の小さい範囲では1100Kの方が大きい。が、 d_0^2 値の大きい範囲では小さくなる。

燃料油AはC重油であるが、燃焼時間は燃料油Lとほぼ同様の挙動を示す。つまり、燃焼時間は空気温度850Kに於いてステップ状に変化し、空気温度950Kと1100Kの関係でも d_0^2 値の大きい範囲で950Kの方が大きい。

次に、他の燃料油（C重油）の d_0^2 値と燃焼時間を図2の蒸留曲線と同じ分類で図5と6に示す。両

図3 初期直径の二乗値と燃焼時間

図4 初期直径の二乗値と燃焼時間

図中、燃焼時間は近似直線で示した。

図5に示した燃料油C, I及びE, G, Hで、燃焼時間は燃料油Aと同様の挙動を示す。つまり、空気温度850Kで燃焼時間はステップ状に変化し、空気温度が等しければ燃焼時間の増加量はほぼ等しい。空気温度1100Kで d_0^2 値が大きければ、燃焼時間は950Kでの値より小さい。

図6の場合、燃料油Dの燃焼時間は空気温度850KでケースⅠからケースⅡに遷移する d_0^2 値が比較的大きいことを除くと、これまでに述べた他のC重油とほぼ同様の傾向を示す。一方、燃料油Bの場合、以下の点が他のC重油と異なる。空気温度850Kでは燃焼時間はケースⅡのみである。また、空気温度1100Kの燃焼時間は実験範囲内で950Kの値と比べて大きい。

3.3 液滴の燃焼過程 これまでに述べた結果を考察するために、燃料油J, K, L, A及び図6で燃焼時間が他のC重油と異なる傾向を示した燃料油Bについて、高温空気中で着火・燃焼する液滴の写真を図7に示す。各液滴の d_0^2 値は 2.56mm^2 ($d_0 = 1.6\text{mm}$)で、図中のIgは液滴の着火位置を、右端は燃焼終了時を示す。

空気温度850Kの場合、燃料油J, K, L, Aの液滴はその大きさが減少を続けた後に着火するのに対し、燃料油Bの液滴は4秒で一度増加する。着火

遅れは燃料油Jが最も小さく、燃料油Bが最も大きい。着火後の液滴の大きさは軽質油の燃料油J, K, Lが時間とともに減少するのに対し、C重油の燃料油A, Bが燃焼中に増加する。

空気温度950Kの場合、燃料油J, K, L, Aの液滴は着火遅れが小さくなることを除くと、着火の順序も含めて、ほぼ850Kの場合と同様の挙動を示す。燃料油Bは液滴が大きくなった時に着火する。

空気温度が1100Kになると着火遅れはさらに小さくなり、着火の順序もこれまでの空気温度と異なる。また燃焼中に液滴が連続的に減少する燃料油はJのみとなり、燃料油K, Lも燃焼中に液滴の大きさが増加する。

3.4 液滴直径の変化 図7で示した写真について液滴直径の時間的変化を測定した結果を図8と9に示す。ここで、縦軸は d^2 値で示した。両図について、主に着火後の d^2 値の挙動を以下に述べる。

図8に示した燃料油Jの場合、空気温度850Kでは、液滴は約3.5秒で着火する。着火後 d^2 値は直線的に減少しており、ここでは d^2 則が成立する。空気温度950Kでは、液滴は d^2 値が減少する前に着火するが、着火後は d^2 則が成立する。すなわち、空気温度950K以下では着火後の傾斜がほぼ一定であり、燃焼速度係数は等しい。従って、この範囲では燃焼時間は着火時の d^2 値で決まり、空気温度が高くなるにつれ着火時の d^2 値が大きくなるため増加する。

一方、空気温度1100Kと950Kを比較すると、着火時の d^2 値は両者でほぼ等しいが、着火後の d^2 値の変化が異なる。空気温度1100Kの場合、 d^2 値の変化は着火から1秒迄とこれ以後とで異なり、1秒以後の燃焼速度係数は空気温度950K以下の場合とほぼ等しい。この温度では、液滴は内部の温度分

図5 初期直径の二乗値と燃焼時間

図6 初期直径の二乗値と燃焼時間

図7 液滴の写真

布が定常状態に達する前に着火するため、着火直後の蒸発量が定常状態のそれに比べて小さいと考える。従って、空気温度が950Kから1100Kに上昇すると、燃焼時間はこの期間の影響を受けて大きくなる。

燃料油Kの場合も、空気温度950K以下では、着火後の d^2 値は燃料油Jと同様にほぼ直線的に減少す

る。従って、空気温度が高くなるにつれ、着火時の d^2 値が増加するため、燃焼時間は大きくなる。これに対し、空気温度1100Kでは、 d^2 値は着火後に増減を繰り返した後減少するが、2.5秒付近で再び激しい増減を繰り返す。このように燃焼中にみかけの液滴直径が増加すると液滴表面からの蒸発量が増加し、燃焼時間は小さくなる。

燃料油LはJとKの混合燃料であるため、 d^2 則は空気温度850Kでは成立するが、950K以上では成立しない。空気温度が850Kから950Kになると着

図8 液滴直径の変化（軽質油の場合）

図9 液滴直径の変化（C重油の場合）

火後にみかけの d^2 値が増加するが、着火時の d^2 値が大きくなる効果の方が強いので燃焼時間は大きくなる。空気温度が1100Kになると燃焼中の d^2 値の変動がさらに大きくなり、この結果として燃焼時間は小さくなる。

次に、C重油の燃料油AとBについて述べる。

図9の燃料油Aの場合、空気温度850Kでは、液滴は d^2 値が僅かに減少した時期に着火し、着火後は d^2 値が増加する。空気温度950K以上では、着火時の d^2 値はほぼ等しいが、空気温度が高くなると燃焼中の d^2 値の増加割合は大きくなる。

燃料油Bの場合、空気温度850Kでは、4秒付近で液滴内部の低沸点成分が沸騰するため d^2 値は一度増加する。そして、約9秒で着火すると d^2 値は再度増加する。空気温度950Kでは、液滴は2.2秒付近から内部で沸騰が始まり、 d^2 値が増加した位置で着火する。空気温度が1100Kになると、 d^2 値は燃料油Aと同様に着火後に増加する。これらの液滴直径の変化からも、液滴は空気温度850Kでは高沸点成分で着火し、950K以上では低沸点成分で着火することがわかる。

両燃料油で示したように、C重油は軽質油と異なり d^2 則が成立しないため、着火時の液滴量を定量的に示すことはできない。しかし、燃料油Bで示したように空気温度が低く着火遅れが大きければ、低沸点成分は液滴が着火する以前に蒸発しており、これが燃焼時間を減少させると考える。同様に、着火後の液滴直径の増加は蒸発量を増加させ燃焼時間を減少させると考える。また、液滴直径の増加量は低沸点成分の少ない燃料油Bの方が大きい。

他のC重油についても、空気温度950Kに於ける d^2 値の変化を読み取った。それらを図2とほぼ同じ分類でC, I, DとE, G, Hに分けて図10に示す。この図では変化の概略を示すため液滴直径の読み取り間隔を0.1秒とした。各燃料油の液滴は燃料油Aと同様に内部で沸騰が始まる前に着火する。

ここで、空気温度950Kに於ける燃焼後期の d^2 値の最大値を燃料油A, Bも含めて比較すると、それらはほぼ(A, C, I) < (E, G, H) < (B, D)のグループ順となる。この傾向は図2の分類と一致し、また低沸点成分が少ないほど燃焼中の液滴直径が大きいことを示した既報¹¹⁾とも一致する。

これまでは初期直径の大きい液滴について述べたが、次に燃焼過程に及ぼす懸垂棒の影響が大きいと考えられる初期直径の小さい液滴について述べる。

図11は空気温度1100Kで、燃料油K, L, A, Bの d_0^2 値が 1.21mm^2 の液滴の変化を示す。

燃料油K, Lの場合、着火後の d^2 値はほぼ直線的に減少する。この傾向は図8で示した初期直径が大きい場合の燃料油Jと同様である。燃料油A, Bについても、着火後の d^2 値の変化は図9と比較して小さいことがわかる。つまり、初期直径が小さければ液滴中に占める懸垂棒の割合が多いため沸騰する低沸点成分の量が少なく、燃焼中の d^2 値の変化は小さくなる。

これらの結果から、図3と4で示した初期直径に対する燃焼時間の増加量が空気温度で異なる現象は次のように説明できる。

空気温度が高くなるにつれて着火時の液滴量は増加する。この時の増加割合は懸垂棒を除いた真の液滴量で比較すると、初期直径の小さい液滴の方が大きい液滴に比べて相対的に大きくなる。このため、燃焼時間は初期直径の小さい液滴ほど増加する。一方、空気温度が高くなることで、燃焼

図10 液滴直径の変化 (C重油の場合)

図11 液滴直径の変化
(初期直径が小さい場合)

中にみかけの液滴直径は増加する。この現象は初期直径の大きい液滴ほど著しく、燃焼時間を減少させる。このような理由により、初期直径に対する燃焼時間の増加割合は空気温度が高くなるにつれて小さくなる。

これまでの結果は初期直径の大きい液滴ほど燃焼時間に及ぼす懸垂棒の影響が小さいことを示した。このため、各燃料油について測定が可能であった大きさとして、 d_0^2 値が 2.56mm^2 ($d_0=1.6\text{mm}$)の液滴の燃焼時間を求めた。以下はこの値を用いて各燃料油の燃焼時間を比較する。

3.5 空気温度と燃焼時間 これまで主に軽質油について、燃焼時間は空気温度が低ければ着火時の液滴量の影響を受け、空気温度が高ければ燃焼中の蒸発量の影響を受けることを示した。ここで、空気温度と燃焼時間の関係を明確に示すため、両者の関係を燃料油J～MとA～Iに分けて図12に示す。

燃料油J～Mに於いて、燃焼時間は空気温度が950K迄は空気温度が上昇するにつれて増加する。その後、燃料油Jの燃焼時間は空気温度とともに僅かに増加するのに対し、燃料油K, L, Mの燃焼時間は空気温度950Kで最大値を示した後、空気温度が高くなるにつれて減少する。燃焼時間が減少する割合は燃料油Kの混合割合が多いほど大きい。

図12 空気温度と燃焼時間

燃料油A～Iに於いても、空気温度と燃焼時間の関係は燃料油K～Mと同様の傾向を示す。燃焼時間が最大値を示す空気温度は燃料油Bのみが1000K、他の燃料油が950Kである。空気温度950Kで燃料油Bの燃焼時間が他の燃料油より小さい理由は、図9で示したように液滴が低沸点成分の沸騰中に着火することから、主に着火時の液滴量が少ないためと考える。また、この図に示したC重油の場合、燃料油による燃焼時間の違いは空気温度の低い範囲で大きい。空気温度が高くなるにつれて小さくなる。これまでの結果から、C重油の燃焼時間は軽質油と同様に、空気温度が低ければ着火時の液滴量が影響し、高ければ燃焼中の蒸発量が影響すると考える。

3.6 燃焼時間と燃料油の動粘度 燃料油の密度や動粘度が燃焼時間に影響を及ぼすと考えられるため、今回使用した各燃料油の動粘度と燃焼時間の関係を図13に示す。ここでは使用した軽質油とC重油とを分離して示すため動粘度を用いた。このため、軽質油J～Mは図中の左側に示される。

この図から、着火遅れや燃焼中に於ける液滴直径の変化の影響が小さい空気温度950Kでは、燃焼時間は燃料油の動粘度に対してほぼ一定値を示すことがわかる。

3.7 液滴の寿命 エンジン内の燃焼では、燃料油が燃焼室内に噴射されてから燃焼が終了するまでの時間が重要と考えられる。これに対応するために、液滴の燃焼時間と前報¹²⁾で記述した着火遅れを加えた値を液滴の寿命とし、この値と空気温度との関係を燃料油J～Mと燃料油A～Iに分けて図14に示す。ここでは液滴がケースIで着火する場合のみを示した。

燃料油J～Mでは、燃焼時間はほぼ等しく、着

図13 動粘度と燃焼時間

火遅れは燃料油L, M, Kの順で大きくなることが明確に示される。つまり、液滴の寿命は主に着火遅れに依存し、その値は空気温度が高くなるにつれて着火遅れが減少するために減少する。

燃料油A～I (C重油) についても、液滴の寿命は燃料油J～Mと同様の傾向を示すことがわかる。

この結果をエンジンの燃焼に適用すると、次のように考えられる。

船用エンジンの場合には燃料油の噴射期間が長く、後期に噴射された液滴は初期に噴射された液滴に比べてより高温雰囲気中で着火・燃焼する。従って、各々の寿命は後から噴射される液滴ほど小さくなる。このことは、着火遅れの異なる燃料油を

用いた場合でも、燃焼終了時の差は着火遅れの差に比べて小さくなる。

4. まとめ

高温静止空気中で単一液滴の燃焼時間を調べ、今回使用した燃料油について以下の結論を得た。

1) 懸垂液滴の場合、燃焼時間は液滴の初期直径の二乗値とともに増加するが、その増加割合は空気温度が高くなるにつれて小さくなる。

2) 空気温度が低ければ着火時の液滴量が減少するため、燃焼時間は減少する。また、空気温度が高くなるにつれて燃焼中にみかけの液滴直径が増加すると蒸発量が増加し、燃焼時間は減少する。このため、燃焼時間は空気温度に対して最大値を示し、この値は各燃料油でほぼ等しい値を示した。

4) 液滴の寿命は空気温度が上昇するにつれ、主に着火遅れが減少することにより減少する。

参考文献

- 1) Kobayasi, K., Proc. 5th Symp. (Int.) Comb., (1955), 141.
- 2) 末次ら, 内燃機関合同シンポジウム前刷集(1981), 121.
- 3) 伊藤・河野・飯沼, 舶機誌, 17-7(1982), 534.
- 4) 岡田, 舶機誌, 18-4(1983), 348.
- 5) 玉木・久保田・堀井, 舶機誌, 22-6(1987), 363.
- 6) 嶺山・淡井, 舶機誌, 24-1, (1989), 44.
- 7) 玉木・平田・石川ら, 舶機誌, 27-11(1992), 862.
- 8) 武井ら, 燃焼の科学と技術, Vol.1(1992), 11.
- 9) 林・清水・上原, 舶機誌, 33-6(1998), 431.
- 10) 前田・森下・高崎ら, 舶機誌, 33-6(1998), 441.
- 11) 羽鳥, 船研報告, 35-1(1998), 1.
- 12) 羽鳥, 舶機誌, 35-4(2000), 245.

図14 空気温度と液滴の寿命