高圧力雰囲気中における燃料液滴の蒸発挙動*

野村 浩司^{*1}, 氏家 康成^{*1}

Evaporation Behavior of Fuel Droplet at High Pressures

Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

Single-droplet evaporation of fuel at high pressures and high temperatures has been studied experimentally. Suspended n-heptane and n-hexadecane droplets were employed in the experiments at pressures in the range of 0.1-5.0 MPa, and temperatures varying from room temperature to 800 K. The initial droplet diameter range of the experiments was 0.4-0.8 mm. Evaporation processes were observed by a CCD camera with a backlight and recorded by a video recorder. A computer-aided image analysis system was developed and applied in order to obtain precise temporal variations of the droplet diameter. The variation of the squared nondimensional droplet diameter with the corrected time is independent of the initial droplet diameter at 0.1 MPa. At high pressures, the slope of the variations tend to become steeper as the initial droplet diameter is increased. The ratio of the initial heat-up period to the evaporation lifetime increases with increased ambient temperature. At ambient temperatures sufficiently above the critical temperature of the fuel, the ratio tends to decrease gradually.

Key Words: Droplet, Evaporation, Fuel, High Pressure, High Temperature, Image Analysis, Supercritical Condition

1. 緒 論

噴霧燃焼はディーゼル、ガスタービンおよびロケットエンジンなどの燃焼器に用いられている燃焼方式であり、その機構解明は工学的に重要である。これらの燃焼器では、高圧力雰囲気中で噴霧燃焼が行われるが、これに関する基礎的な研究は少なく、未だ不明な点が多い。噴霧燃焼は噴霧、蒸発、拡散、燃焼の4つの過程から成り立っており、相互に影響を及ぼすので現象が非常に複雑である。

高圧力下の噴霧燃焼の重要な過程である高温高圧力雰囲気中の液滴蒸発に関する実験的研究は少なく、Matloszら⁽¹⁾、廣安ら⁽²⁾および角田と廣安⁽³⁾以外にほとんど見あたらない。特に超臨界雰囲気における実験的研究は不足しており、理論的研究の検証に用いる実験データの必要性が提言されている⁽⁴⁾。

蒸発器や噴霧燃焼器を設計する場合、液滴が蒸発に要する時間、すなわち液滴寿命は重要なパラメータである。液滴寿命の簡単な見積りには、準定常理論より導かれた蒸発係数を利用する方法があるが、高温高圧

力雰囲気の場合、蒸発係数は時間とともに変化するもので、蒸発の非定常性を考慮する必要がある。非定常蒸発の機構を解明することは工学的に重要、かつ興味を持たれるところである。典型的な非定常蒸発が起こる初期加熱期間が液滴寿命に占める割合は、液滴蒸発の非定常性を示す尺度の一つになると考えられる。本報では、高温高圧力雰囲気における燃料液滴の蒸発に関して実験を行い、液滴の蒸発挙動、液滴直径の2乗の時間変化、および初期加熱期間が液滴寿命に占める割合の雰囲気温度・圧力依存性について報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1に実験装置の概略を示す。図の中央は、超々ジュラルミン製の高圧容器で、その内部は $\phi 80 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ の円筒形である。高圧ボンベ中の窒素を導くことにより容器内を昇圧した。高圧容器内部には、液滴生成装置、液滴移動装置、および高温室が組み込まれている。高温室の外部下方で作られた液滴は、液滴移動装置の石英線(直径 0.15 mm)の端部に懸垂され、高温室内に挿入される。液滴の移動に要する時間は約 0.16 s であった。液滴移動開始時および終了時における液滴の落下を防止するた

* 平成5年10月2日 第71期全国大会において講演、原稿受付 平成6年9月19日。

*¹ 正員、日本大学生産工学部 (〒275 習志野市泉町1-2-1)。

図1 実験装置概略

め、石英線は水平に取り付けられている。高温室はセラミックス製の容器であり、内部は $\phi 30\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ の円筒形である。雰囲気温度は、クロメル・アルメル熱電対を用い、液滴を蒸発させる位置から水平方向に約4 mm 離れた位置で測定した。

燃料として正ヘプタン（臨界温度 $T_{cr} = 540\text{ K}$ ，臨界圧力 $P_{cr} = 2.74\text{ MPa}$ ）および正ヘキサデカン（ $T_{cr} = 722\text{ K}$ ， $P_{cr} = 1.41\text{ MPa}$ ）を用い、雰囲気気体として窒素を用いた。雰囲気温度を室温から 800 K まで、雰囲気圧力を大気圧から 5.0 MPa まで、初期液滴直径を 0.4 から 0.8 mm までそれぞれ変化させ、実験を行った。

2.2 画像処理 液滴の蒸発過程を記録するため、CCDカメラとビデオテープレコーダを用い、背後に光源を置いて液滴の輪郭を撮影した。液滴直径の時間変化は、実験終了後、画像を 512×512 ピクセル、256 輝度レベルのデジタルデータに変換し、パーソナルコンピュータを用いて計測した。図2に示すように、懸垂線軸方向に 10 ピクセルラインを一つの分割領域とし、その分割領域の懸垂線垂直方向輝度分布から液滴の輪郭を決定した。輪郭の位置は、分割領域の雰囲気平均輝度と液滴平均輝度を2対1に内分する輝度を示す最も懸垂線から離れたピクセルの位置とした。液滴の輪郭を決定した後、分割領域を円盤と仮定して液滴の体積を求め、その体積と等価な体積の球の

図2 画像処理の方法

直径を液滴直径と定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 蒸発中の液滴の挙動 図3に、亜臨界雰囲気および超臨界雰囲気中で蒸発する正ヘプタン液滴の連続写真を示す。ここで、亜臨界雰囲気とは雰囲気温度 T_a 、圧力 P_a のいずれかが燃料の臨界値以下である雰囲気のことであり、超臨界雰囲気とは T_a および P_a がともに燃料の臨界値を超える雰囲気のことである。両連続写真とも1こま目は高温室に挿入された直後の液滴であり、液滴温度はほぼ室温である。亜臨界雰囲気中の液滴の場合、4こま目以降、液滴の懸垂線側下方に蒸気の影が観察される。液滴温度が上昇し、蒸発が激しくなったことを示していると考えられる。超臨界雰囲気中では、亜臨界雰囲気中の場合と比較し、早い時期から燃料蒸気の影が観察され、その影が懸垂線側で濃く、徐々に大きくなる。本研究で行った実験条件の範囲では、超臨界雰囲気中であっても液滴の存在が確認された。また、液滴は懸垂線から落下することはない。これらのことから、蒸発中の液滴温度は臨界温度に達していないことがわかる。図4に、液滴の中心を通る鉛直線上の輝度分布を示す。雰囲気温度を約600 K で一定にし、雰囲気圧力を変化させた。雰囲気圧力が低い場合、液滴と雰囲気境界における輝度分布の傾きは急であり、液滴の輪郭が鮮明である。一方、雰囲気圧力が高い場合、その傾きは緩く、液滴の輪郭が不鮮明であることがわかる。液滴の輪郭は、液滴表面で接する気体と液体の密度差が減少するに伴い不鮮明になる。図4の場合、雰囲気温度が燃料の臨界温度より高いので、雰囲気圧力の増大に伴って沸点が上昇または消滅し、液滴の表面温度が上昇する。実験結果は、雰囲気圧力の増大に伴って液滴表面で接する燃料の液体と気体が臨界状態に近づき、両者の密度差が減少していることを示していると考えられる。このこ

図3 蒸発する正ヘプタン液滴 (a) $T_a=742$ K, $P_a=1.0$ MPa, 10 frames/s, (b) $T_a=671$ K, $P_a=5.0$ MPa, 16.7 frames/s

とより、図3(b)に観られるような液滴の下濃い影は、臨界温度に近くなって粘性力が低下し、重力に引かれて降下する液体の燃料である可能性が示唆される。本実験のような重力や強制対流がある場では、液滴蒸発の機構が超臨界雰囲気と亜臨界雰囲気で異なる可能性があると考えられる。また、高温高圧力雰囲気では、輝度測定の誤差および液滴の輪郭の定義が液滴直径の測定結果に大きく影響することがわかる。

図4 液滴の中心を通る鉛直線上の輝度分布

3・2 液滴直径の時間変化 正ヘプタン液滴について、液滴直径 d の時間変化を詳細に調べた。図5に、液滴直径の2乗 d^2 の時間変化を亜臨界雰囲気および超臨界雰囲気について示す。横軸の原点は、液滴移動終了時刻である。液滴の最終直径は、液滴落下防止のために設けられた懸垂線端部の球(図2参照)の直径に相当する。図の下段右の条件において d^2 の時間変化がなめらかな曲線にならないのは、高温高圧力雰囲気であるために液滴の像がゆらぐこと、前節で述べたように液滴の輪郭が不鮮明であることなどの原因による測定誤差のためと考えられる。 d^2 は、初期液滴直径 d_0 および雰囲気条件に依らずほぼ同様な時間変化を示す。蒸発初期にみられる減少率の小さい期間は初期加熱期間と呼ばれ、液滴に流入する熱が液滴の温度上昇に消費されるため蒸発量が少ないこと、液滴の熱膨張があることなどの理由で蒸発の初期段階に存在すると考えられている。初期加熱期間を経た後、 d^2 はほぼ直線的に減少する。この期間中、液滴はほぼ準定常的に蒸発していると考えられる。雰囲気温度の上昇に伴い、初期加熱期間が液滴寿命に占める割合が増加し、 d^2 の時間変化を示す曲線が終始上に凸な曲線になる傾向が認められる。このことは、液滴蒸発の非定常性が雰囲気温度の上昇に伴い増すことを意味していると考えられる。初期加熱期間が液滴寿命に占める割合の雰囲気温度・圧力依存性については次節で述べる。図5

図5 液滴直径の2乗の時間変化

で用いた実験結果を、無次元液滴直径の2乗(d/d_0)²と修正時間の関係で示したのが図6である。修正時間とは、時間を d_0 の2乗で除した値である。最終の無次元液滴直径が d_0 の減少に伴って増加しているのは、最終液滴直径(一定)が d_0 に対して相対的に大きくなるためである。雰囲気圧力が0.1 MPaの場合、(d/d_0)²の修正時間に対する変化を示す曲線は d_0 の影響を受けず、雰囲気条件に固有である。雰囲気圧力が1.0および5.0 MPaの場合、(d/d_0)²の修正時間に対する挙動は同一雰

囲気条件においてほぼ同じであるが、 d_0 の増加に伴って曲線の傾きが急になる傾向が認められる。曲線の傾きの d_0 依存性は、雰囲気圧力の増大に伴って顕著になる。自然対流の影響の尺度となるグラスホフ数が液滴直径の3乗に比例し、その比例係数が圧力の2乗にほぼ比例することを考慮すれば、 d_0 の増加に伴って曲線の傾きが急になるのは、自然対流による蒸発促進効果が増大したためと考えられる。

3・3 初期加熱期間が液滴寿命に占める割合 前

図6 無次元液滴直径の2乗の修正時間に対する変化

節で述べたように、初期加熱期間が液滴寿命に占める割合は雰囲気条件に依存して変化する。この初期加熱期間が液滴寿命に占める割合は、液滴蒸発の非定常性の尺度となると考えられる。本節では、正ヘプタンおよび正ヘキサデカン液滴について、初期加熱期間が液滴寿命に占める割合の雰囲気条件依存性を調べた。初期加熱期間の終了時刻は明確でないで、以下のように定義した。図7に、モデル化した d^2 の時間変化を示す。時刻が零および液滴直径が d_0 である点Aにおいて、

液滴の蒸発が開始する。初期加熱期間を経た後、 d^2 は直線的に減少して点Bに至り、蒸発が終了する。この時刻 t_B を蒸発終了時刻と呼ぶことにする。 d^2 が、初期液滴直径の2乗の2分の1以下であるデータ点を最小2乗法で近似した直線がDEである。点Fは、点Aから横軸に平行に引いた直線と直線DEの交点である。点Fの時刻 t_F 以前を初期加熱期間、以降を準定常蒸発期間と定義した。直線DEと横軸の交点を点Eとすると、その時刻 t_E は懸垂線直径を零と仮定したときの蒸発

図7 初期加熱期間の定義

終了時刻と考えられる。本報では、 t_E を液滴寿命と定義した。液滴寿命に占める初期加熱期間の割合を初期加熱期間割合 ϕ_I と定義すると、 ϕ_I は初期加熱期間終了時刻 t_F および液滴寿命 t_E を用いて、

$$\phi_I = t_F / t_E \quad (1)$$

と表される。式(1)は幾何学的な考察により、

$$\phi_I = (d_D^2 - d_0^2) / d_D^2 \quad (2)$$

と変形することができる。実験結果から ϕ_I を求めるときは、式(2)を用いた。

図8および9に、正ヘプタンおよび正ヘキサデカンについて、 ϕ_I の雰囲気温度依存性を調べた結果を示す。 d_0 の範囲は0.6から0.7 mmである。図中の曲線は、実験値を最小2乗法により2次近似した曲線である。正ヘキサデカンの無次元雰囲気圧力 P_a/P_{cr} が3.5の場合を除き、 ϕ_I は雰囲気圧力に依らずほぼ同様な雰囲気温度依存性を示す。雰囲気温度の上昇に伴い ϕ_I は増加し、次第に傾きが緩やかになる。さらに雰囲気温度が上昇すると、 ϕ_I が減少する傾向がみられる。正ヘキサデカンの P_a/P_{cr} が3.5の場合、雰囲気温度の上昇に伴い ϕ_I が増加する点はこの条件と同様であるが、次第に傾きが急になる点異なる。正ヘキサデカンの P_a/P_{cr} が1.4の曲線が直線に近いことを考慮すると、 ϕ_I と雰囲気温度の関係を示す曲線は、雰囲気圧力の増大に伴い、上に凸な曲線から下に凸な曲線に変化すると推察される。無次元雰囲気温度 T_a/T_{cr} が1付近における ϕ_I の雰囲気温度依存性は、雰囲気圧力の増大に伴い大きくなる。一方、 ϕ_I の雰囲気圧力依存性は、正ヘプタンについては T_a/T_{cr} が0.7付近、正ヘキサデカンについては0.85付近を境にして変化する

図8 初期加熱期間が液滴寿命に占める割合と雰囲気温度の関係（正ヘプタン）

図9 初期加熱期間が液滴寿命に占める割合と雰囲気温度の関係（正ヘキサデカン）

る。低温側では、 ϕ_1 は雰囲気圧力の増大に伴い減少し、高温側では増加する。ただし、正ヘプタンの P_a/P_{cr} が 1.8 の曲線は、 T_a/T_{cr} が 0.9 を越えるまで、 P_a/P_{cr} が 0.73 の曲線よりやや低い値を示している。

ϕ_1 の雰囲気温度依存性については、以下のように考えることができる。雰囲気温度が沸点より低い場合、雰囲気温度の上昇に伴い、最終液滴温度が上昇する⁽⁵⁾。また、液滴に流入する単位時間当たりの熱量が増加する。最終液滴温度の上昇は、初期加熱期間を長くする効果と、蒸発潜熱を減少させるので準定常蒸発期間を短くする効果を持つ。単位時間当たりの流入熱量の増加は初期加熱期間および準定常蒸発期間の両方を短くする効果を持つ。結果として、準定常蒸発期間が初期加熱期間より急速に短くなり ϕ_1 が増加する。一方、雰囲気温度が沸点より高い場合、雰囲気温度の上昇に伴い、液滴に流入する単位時間当たりの熱量は増加するが、最終液滴温度が沸点に漸近するので雰囲気温度に対する最終液滴温度の上昇率は減少する。結果として、準定常蒸発期間と初期加熱期間が同程度に短くなり、 ϕ_1 の雰囲気温度依存性は小さくなると考えられる。さらに雰囲気温度が高い場合は、雰囲気温度の上昇に伴い、液滴周囲の燃料蒸気の温度伝導率が増加することが支配的になり、 ϕ_1 が減少すると推察される。 ϕ_1 の雰囲気圧力依存性については、以下のように考えることができる。雰囲気圧力の増大に伴い最終液滴温度が上昇する⁽⁵⁾。最終液滴温度の上昇は、初期加熱期間を長くする効果、液滴と雰囲気との温度差を減少させるので準定常蒸発期間を長くする効果、および蒸発潜熱を減少させるので準定常蒸発期間を短くする効果を持つ。低温雰囲気では2番目の効果が支配的となり ϕ_1 が減少し、高温雰囲気では3番目の効果が支配的となり ϕ_1 が増加すると考えられる。

4. 結 論

燃料として正ヘプタンおよび正ヘキサデカンを用い、雰囲気温度・圧力をそれぞれ室温から 800 K、大気圧から 5.0 MPa の範囲で変化させ、単一燃料液滴の蒸発に関する実験的研究を行った。その結果、以下のような結論を得た。

(1) 本実験の雰囲気条件では、超臨界雰囲気においても、液滴は亜臨界状態で存在した。雰囲気圧力の増大に伴い、液滴表面で接する気相の燃料と液相の燃料の密度差が小さくなる現象が超臨界温度の雰囲気において観察された。

(2) 正ヘプタンに関して、初期液滴直径を 0.4 から 0.8 mm の範囲で変化させ、修正時間に対する無次元

液滴直径の2乗の変化を調べた。雰囲気圧力 0.1 MPa では、修正時間に対する無次元液滴直径の2乗の変化に初期液滴直径は影響を及ぼさない。雰囲気圧力の増大に伴って初期液滴直径の影響が現れ、初期液滴直径の増加に伴って曲線の傾きが急になる傾向がみられる。

(3) 無次元液滴直径の2乗は、各雰囲気圧力条件における低温雰囲気ではほぼ直線的に減少するのに対し、高温高圧雰囲気では上に凸な曲線を描き減少する。初期加熱期間が液滴寿命に占める割合は、雰囲気温度の上昇に伴って増加する。超臨界雰囲気温度においては、頭打ちになり、その後減少する傾向がみられる。燃料の臨界温度付近の雰囲気温度においては、雰囲気圧力の増大に伴い、初期加熱期間が液滴寿命に占める割合の雰囲気温度依存性が増す。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多大なるご助力と有益な助言を賜りました東京大学工学部航空宇宙工学科の河野通方教授および石川島播磨重工業(株)の佐藤順一氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Matlosz, R. L., Leipziger, S. and Torda, T. P., Investigation of Liquid Drop Evaporation in a High Temperature and High Pressure Environment, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**(1972), 831.
- (2) 廣安博之・角田敏一・千田達郎・今本敏彦, 高温高圧の気体中における単一液滴の蒸発, *機論*, **40**(1974), 3147.
- (3) 角田敏一・廣安博之, 超臨界雰囲気中における液体燃料の蒸発, *機論*, **44**(1978), 3884.
- (4) Farrel, P. V. and Peters, B. D., Droplet Vaporization in Supercritical Pressure Environments, *Acta Astronautica*, **13**(1986), 673.
- (5) 野村浩司・丹羽マリオ・津江光洋・佐藤順一・河野通方, 高圧力雰囲気における炭化水素燃料液滴の蒸発, *日本熱流体工学会論文集*, **5** (1989), 90.