



放射加熱による単一懸垂燃料液滴の蒸発と爆発

Evaporation and Explosion of a Single Suspended Fuel Droplet by Radiative Heating

野村 浩司 (Hiroshi Nomura)	原 将史 (Masafumi Hara)	氏家 康成 (Yasushige UJIIE)
日本大学 (Nihon Univ.)	日本大学大学院 (Nihon Univ.)	日本大学 (Nihon Univ.)

Single-droplet evaporation and explosion by radiative heating has been studied experimentally. A suspended droplet of n-heptane, n-decane or n-dodecane was employed in the experiments. A CO₂ laser was used as a radiative heat source. An X-type suspender made of gold wires of 10 μm in diameter was employed, which well reflects the CO₂ laser light. Radiative power density was varied up to 1.34 W/mm². Evaporation behavior of a droplet was recorded with a high-speed video camera. Temporal variations of the droplet diameter were measured from sequential images of a droplet with a PC software developed. It was observed that droplet diameter decreases rapidly after the initial heat-up period, and then decreases slowly. The d^2 -low dose not hold true in the droplet evaporation by radiative heating. At large radiation power densities and large initial droplet diameters, droplet explosion was observed. The time required for droplet diameter to become half after the initial heat-up period, the half-diameter period, was employed as a measure of evaporation rate. The half-diameter period increases with the increase in the initial droplet diameter. In the case of n-decane and n-dodecane, at low radiation power densities, the half-diameter period decreases with the initial droplet diameter, and then increases. At large radiation power densities, the half-diameter period increases almost proportionally to the inverse of radiation power density, and plots of all fuels lie on the same straight line.

Key words: Radiation, Droplet, Evaporation, Explosion, Liquid Hydrocarbon Fuel, Spray Combustion

1. 緒言

噴霧燃焼はディーゼル機関や、ガスタービン、ロケットエンジン、工業炉などの燃焼器に採用されている。噴霧は多数の液滴により構成され、その燃焼は燃料の蒸発、拡散・混合および燃焼が同時に進行し、相互に影響を及ぼすため、現象の詳細を解明することが難しい。噴霧燃焼を解明する手法の一つとして、噴霧を微視的にとらえた単一液滴の蒸発に関する研究が行われてきた⁽¹⁻⁷⁾。実機の燃焼器では、噴霧中の液滴蒸発は温度や圧力、気体との相対速度などの影響の他に、火炎や壁からの放射の影響を受ける。近年、燃料液滴の蒸発・燃焼の数値解析で放射の影響が考慮されるようになってきた^(8,9)。本研究では、噴霧燃焼における燃料液滴の蒸発過程に着目し、放射加熱が液滴蒸発に及ぼす影響の解明を目的とした。液滴蒸発に及ぼす放射

加熱の影響を顕在化させるため、放射加熱源に炭酸ガスレーザを使用し、強い放射加熱を液滴に対して行った。自由液滴を用いた実験が理想的であるが、自由液滴を空間に静止させるのが困難であるため、単一懸垂液滴を対象とした実験を行った。本報では、液滴の放射加熱蒸発を、非定常性が特に強い初期加熱期間とそれ以降の期間に分けて揮発性の異なる炭化水素燃料液滴の滴蒸発過程を実験的に調べ、液滴蒸発・爆発に及ぼす放射加熱の影響について考察した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。放射加熱源として、火炎からの放射には炭酸ガスからの放射が多く含まれていること、波長分布幅が狭くて解析が容易なことなどの理由から炭酸ガスレーザ（波長 10.55 ~ 10.63 μm, 出力 35 W）を用いた。放射出力密度を変化させ

るため、炭酸ガスレーザーには焦点距離 95.25 mm のジ
ンクセレン凸レンズを取り付け、焦点と液滴の距離を
変化させた。懸垂線への液滴の付着力を増大させるた
め、2本の懸垂線を直交させ、その交点に液滴を付着
させた。懸垂線には、炭酸ガスレーザーの放射エネル
ギーの99.4%を反射する金線を用いた。懸垂線の長さ
は 14 mm であり、懸垂線が蒸発に及ぼす熱的影響を
低減させるため、直径 10 μm の線を使用した⁽¹⁰⁾。ま
た、穴直径 2 mm のアパーチャをレーザー光焦点と懸垂
液滴の間に設置して放射加熱範囲を制限した。アパー
チャの材料には、煉瓦を用いた。レーザーの始動時出力
不安定性を考慮し、暖機運転後に放射加熱を開始する。
暖機運転中のレーザー光を遮断するため、ロータリーソ
レノイドと金属板を用いたシャッターを設けた。放射
開始時刻を明確にするため、シャッターに位置センサ
を設け、画像に赤色レーザーによるマークを記録した。

懸垂線交点における放射出力密度は、懸垂線の交点、
直径 1.6 mm の円孔をもつ金属板、およびカロリー
メータをレーザー光軸上に並べ、懸垂線交点を中心と
する直径 1.2 mm の円内を通過するレーザー光の放射出力
をカロリメータで計測し、直径 1.2 mm の円の面積
で除すことによって求めた。液滴観察装置として、高
速度ビデオカメラ（露光時間：8 ms、フレームス
ピード：60, 125, 250 fps）を用いた。液滴の背後に光
源を置き、液滴の輪郭を撮影した。画像は、1 画面あ
たり横 512 ピクセル、縦 480 ピクセル、輝度 256 階
調のデジタルデータ画像として記録した。無放射加熱
蒸発実験の場合は、CCD カメラ（露光時間：2 ms、
フレームスピード：30 fps）によって現象を撮影し、
デジタルビデオレコーダで記録した。記録されたデー
タを、1 画面あたり横 720 ピクセル、縦 480 ピクセ
ル、輝度 256 階調のデジタルデータに変換し、記録し
た。Fig. 2 に画像解析の方法を示す。5 ピクセルライ
ンごとに画像を横に分割し、各分割領域の輝度を x 軸
方向に平均してその分割領域の y 軸方向輝度分布を得
た。得られた輝度分布から、分割領域の液滴部平均輝
度と雰囲気部平均輝度を 1 対 2 に内分する輝度を示す
最もお互いに近いピクセルの組みの位置を求め、これ
を液滴の輪郭位置とした。各分割領域において液滴の
輪郭を求めた後、それらを楕円近似し、楕円を鉛直軸
回りに回転させた回転楕円体の体積を求めた。得られ
た体積と等しい体積の球の直径を液滴直径と定義した。
本実験の液滴直径範囲では、液滴はほぼ球形であった。

放射出力密度 \dot{q} を 0.41 から 1.35 W/mm^2 まで、初期
液滴直径 d_0 を約 0.2 から 1.0 mm まで変化させて実験を

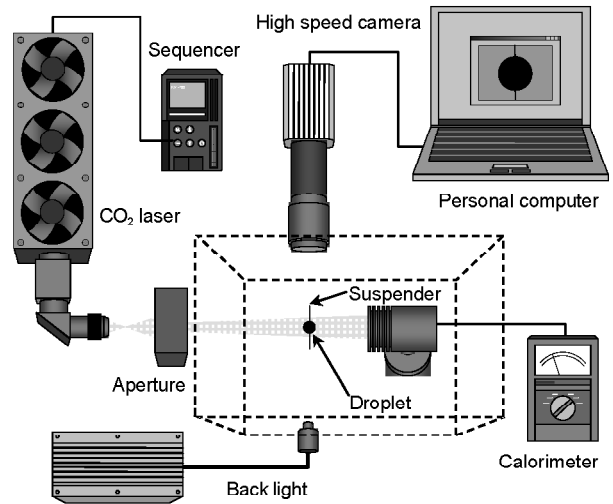


Fig.1 Experimental apparatus.

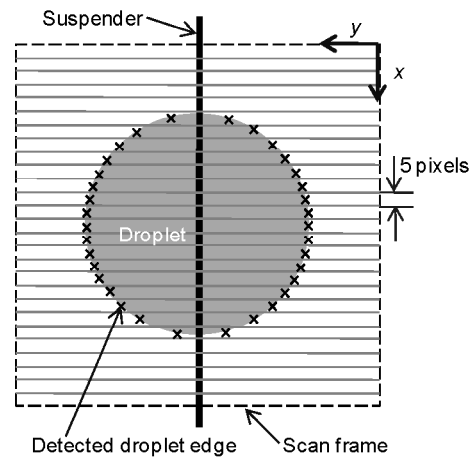


Fig.2 Image processing method.

行った。実験は室温 (293 K)、大気圧で行った。試料
には、正ヘプタン (標準沸点：371.6 K)、正デカン
(沸点 447.3 K) および正ドデカン (489.5 K) を用い
た⁽¹¹⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 放射加熱による燃料液滴の爆発

Fig. 3 に、放射出力密度が 1.25 W/mm^2 の条件で放
射加熱された正ヘプタン液滴の連続写真を示す。爆発
現象の撮影にはイメージインテンシファイア付き高速
ビデオカメラ（露光時間：37 μs 、フレームス
ピード：3500 fps）を使用し、懸垂線を水平に設置した。
液滴の懸垂線が初期液滴直径は 0.88 mm である。1 コ
マ目は放射加熱を開始した直後の液滴であり、液滴温

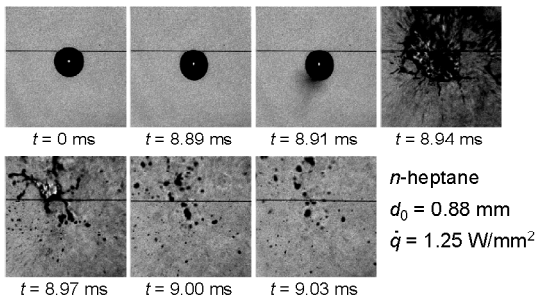


Fig.3 Sequential images of droplet explosion time.

度はほぼ室温である。放射加熱開始から 8.91 ms 後に、液滴の左下から急激な蒸気の吹き出しが起こり、8.94 ms 後に爆発して微細液滴が飛散していることがわかる。このことより、放射加熱により液滴は内部まで加熱されており、蒸発潜熱や雰囲気との熱伝達により冷却されている液滴表面より高温になっていることが示唆される。液滴の爆発は、初期加熱期間において液滴直径が液滴の熱膨張により最大になった後、短い時間を経て起こった。

Fig. 4 に、放射加熱中に液滴が爆発する条件を放射出力密度と初期液滴直径の関係で示す。エラーバーは、同じ放射出力密度で爆発しない最大液滴直径と爆発する最小液滴直径を示しており、それらの平均値がプロットで示されている。高沸点の試料ほど、放射出力密度と初期液滴直径が大きい条件で爆発する傾向を示している。

本報では、爆発直前の液滴直径（以後、爆発液滴直径）と爆発するまでの所要時間（以後、爆発誘導時間）をそれぞれ d_{ex} , τ_{ex} とした。Fig. 5 は、Fig. 4 の爆発領域内で測定された爆発液滴直径を初期液滴直径で除した無次元爆発直径と放射出力密度の関係を示している。爆発直径を初期液滴直径で除しているのは、同一放射出力密度において初期液滴直径と爆発直径が比例関係にあることが実験結果から確認されたからである。放射出力密度が大きいほど、爆発直径は増大し、初期液滴直径に近づくことがわかる。いずれの条件においても、初期加熱期間に起こる液滴の熱膨張により液滴直径が最大となった後に爆発が起こり、放射出力密度が大きい条件ほど、最大直径となった後の早い時期に爆発が起こった。放射出力密度が大きくなるのに伴って爆発液滴直径が初期液滴直径に近づくのは、爆発誘導時間が短くなり、爆発するまでの液滴蒸発量が少なくなっているからと考えられる。このため、蒸発潜熱による液滴の冷却が少ないことで液滴内

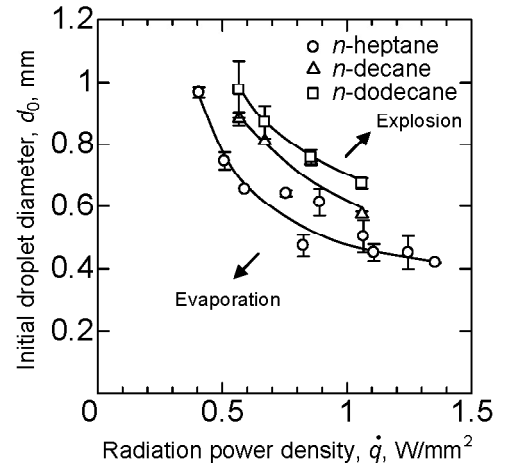


Fig.4 Explosion limit.

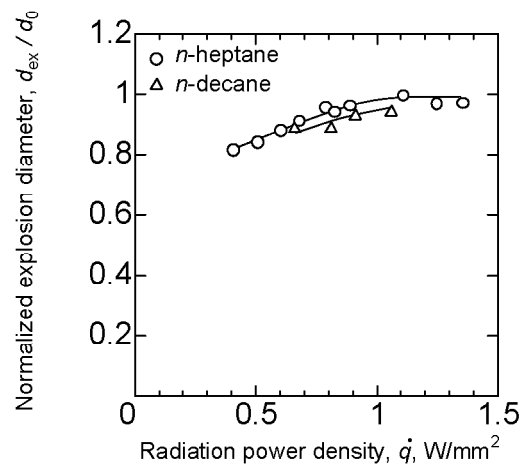


Fig.5 Relation between radiation power density and normalized explosion diameter.

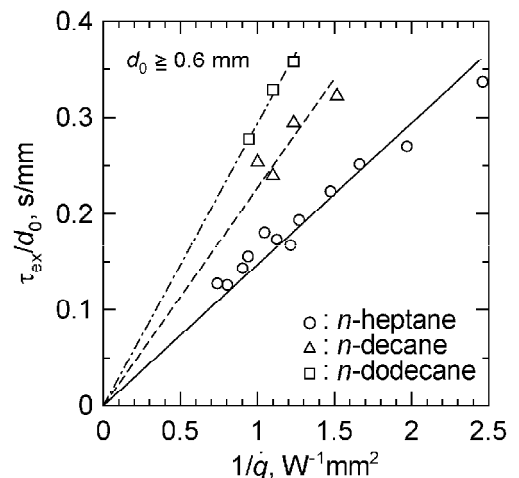


Fig.6 Relation between inverse of radiation power density and normalized explosion time.

部の温度上昇が促進されていると推察される。

Fig. 6 は、初期液滴直径で正規化した爆発誘導時間と放射出力密度の逆数の関係を示している。爆発誘導時間を初期液滴直径で除しているのは、同一放射出力密度において初期液滴直径と爆発誘導時間の関係が、初期液滴直径 0.6 mm 以上ではほぼ比例関係であることが実験結果から確認されたからである。爆発誘導時間は放射出力密度の逆数にほぼ比例して増大することがわかる。また、爆発誘導時間は、ヘプタンが一番短く、デカン、ドデカンの順に長くなることからわかる。これは、初期液滴温度から沸点に達するまでに必要なエネルギーが沸点の高い燃料の方が大きいからであると考えられる。液滴が爆発するまでに吸収する放射エネルギーが全て液滴の温度上昇に使われ、液滴が沸点に達すると爆発すると仮定した場合、次式が成り立つ

$$\eta_r \frac{\pi}{4} d_0^2 \dot{q} \tau_{ex} = \frac{\pi}{6} d_0^3 \rho_l c (T_b - T_0) \quad (1)$$

ここで、 η_r は液滴の放射エネルギー吸収割合、 ρ_l と c は液体燃料の密度と比熱であり、液滴温度に依存しないとする。放射エネルギー吸収割合は、液滴に吸収されたエネルギーが液滴に照射された全放射エネルギーに占める割合と定義した。液滴が放射エネルギーを反射も透過もしない場合、放射エネルギー吸収割合は 1 である。 T_0 と T_b は液滴の初期温度と沸点である。この式を変形して、正規化された爆発誘導時間と放射出力密度の関係を求めると

$$\frac{\tau_{ex}}{d_0} = \frac{2\rho_l c (T_b - T_0)}{3\eta_r \dot{q}} \quad (2)$$

となる。正規化された爆発誘導時間が放射出力密度の逆数に比例することを示しており、Fig. 6 の実験結果に一致する。ヘプタンとデカンの結果を例に比較すると、両者の直線の傾きが異なるのは、式 (2) の $(T_b - T_0)$ が、デカンの場合、ヘプタンの場合に対して約 2 倍大きいことが要因であると考えられる。非常に簡単なモデルではあるが、実験結果をうまく説明していることがわかる。このことより、実験に使用した燃料の場合、初期液滴直径が 0.6 mm 以上の液滴においては、放射エネルギーの吸収割合が初期液滴直径に依存せずほぼ一定であることがわかった。同様な傾向は、文献 9 にも示されている。また、液体密度および比熱（室温と沸点の平均温度の物性値を使用）を代入し、

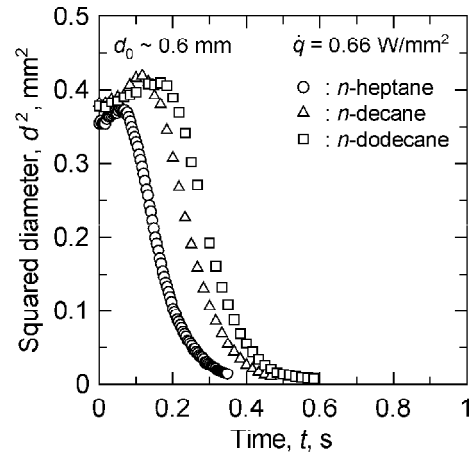


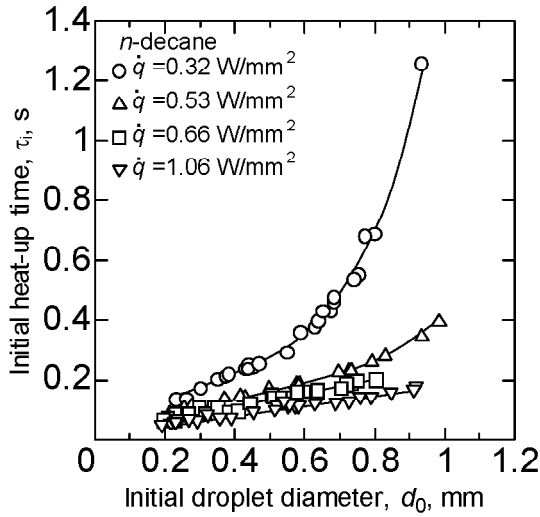
Fig.7 Squared diameter histories of droplet evaporation by radiative heating.

Fig. 6 の直線の傾きから放射エネルギー吸収割合 η_r を算出した。その結果、ヘプタン液滴の場合は η_r が 0.54、デカン液滴の場合は 0.68、ドデカン液滴の場合は 0.68 であった。ヘプタン液滴の場合、爆発に至るまでに蒸発潜熱で奪われた熱エネルギーの影響で η_r が小さく見積もられている可能性がある。

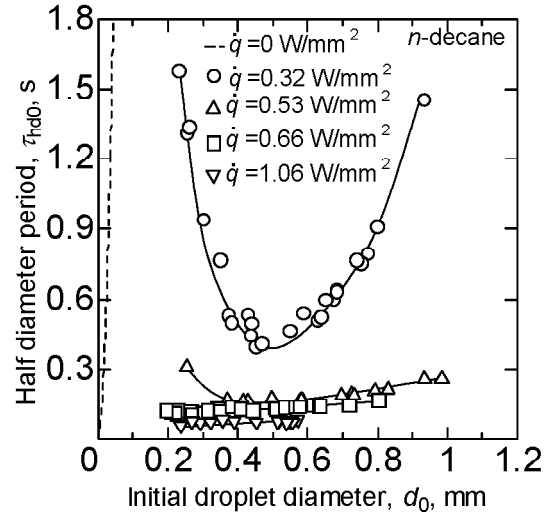
3.2 放射加熱による燃料液滴の蒸発

Fig. 7 に、初期液滴直径がほぼ等しく、燃料が異なる液滴直径履歴を示す。放射出力密度は 0.66 W/mm² である。雰囲気との熱伝達が支配的な蒸発の液滴直径履歴と比較するため、縦軸は液滴直径の 2 乗とした。いずれの燃料においても初期加熱期間が存在し、液滴の熱膨張が観察された。沸点の高い燃料ほど、初期加熱期間が長くなっていることがわかる。初期加熱期間後、液滴直径の減少率は大きくなり、ほぼ一定値に近づいた後、蒸発末期に急激に小さくなる。放射加熱蒸発の場合、 d^2 法則が成り立っていないことがわかる。非常に小さい液滴では、放射加熱の影響はほとんど無く、無放射加熱蒸発にほぼ等しい蒸発速度を示すと考えられる。

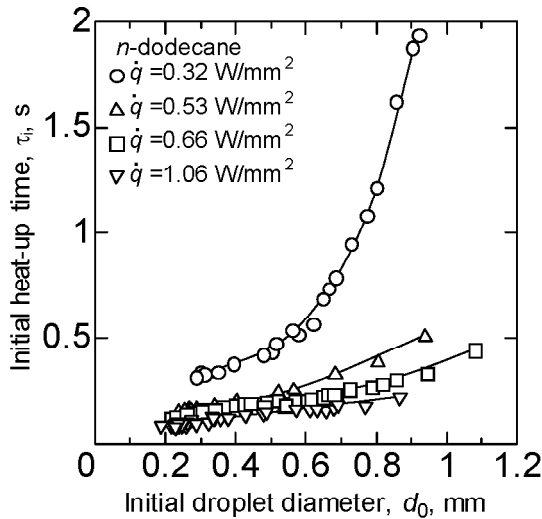
放射加熱蒸発においても、液滴寿命を蒸発の速さの指標として用いることは可能であるが、液滴直径が小さくなると蒸発速度が非常に遅くなるので、放射加熱が液滴蒸発に及ぼす影響を調べるには適当ではないと判断した。放射加熱開始から液滴直径が初期直径の半分になるまでの時間 τ_{hd} から初期加熱時間を除いた時間 τ_{hdo} （以下、液滴直径半減時間）を本報では蒸発の速さの指標として用いた。初期加熱時間 τ_i は、放射加熱開始から液滴直径が熱膨張を経て再び初期液滴直径になるまでの時間と定義した。Fig. 8 に初期加熱時



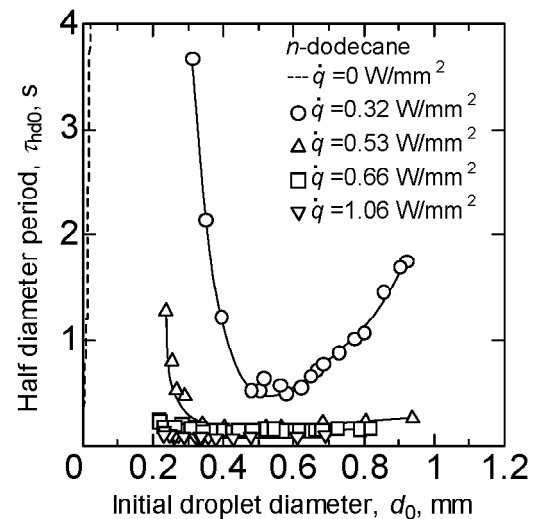
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig.8 Relation between initial droplet diameter and initial heat-up time.

Fig.9 Relation between initial droplet diameter and half diameter period without initial heat-up time.

間と初期液滴直径の関係をデカンおよびドデカンについて示す。図には、初期加熱期間経過後に爆発した液滴のデータも含まれている。初期加熱時間は、放射出力密度の増大に伴って単調に増大する。また、同じ放射出力密度で比較すると、沸点の高い燃料ほど初期加熱時間が長いことがわかる。初期加熱期間では、吸収する放射エネルギーが全て液滴の温度上昇に使われると仮定した場合、式(2)と同様に次式が成り立つ

$$\eta_i \frac{\pi}{4} d_0^2 \dot{q} \tau_i = \frac{\pi}{6} d_0^3 \rho_l c (T_l - T_0) \quad (3)$$

ここで、 T_l は初期加熱期間終了時の液滴温度である。初期直径が0.6 mmより小さい範囲では、初期直径の増大に伴って液滴の放射エネルギー吸収割合が増大すると考えられる⁹⁾。そのため、初期液滴直径の増大に伴って、液滴表面からの熱放出量と放射エネルギーの吸収量のつり合う液滴温度が高くなり、初期加熱期間が増大したと考えられる。初期直径が0.6 mmより大きい範囲では、前述のように液滴の放射エネルギー吸収割合はほぼ一定と考えられるので、液滴表面からの熱放出量と放射エネルギーの吸収量はどちらも液滴直径の2乗に比例する。よって初期加熱期間終了時の液滴温度はあまり変化せず、初期加熱期間は式(3)に示

されるように、初期液滴直径の増大に伴って増大すると考えられる。

放射出力密度を変化させ、 τ_{hd0} と初期液滴直径の関係を調べた結果をデカンおよびドデカンについて Fig. 9 に示す。図中の破線は、室温で蒸発する燃料液滴の蒸発係数を計測し、放射加熱を行わない場合（無放射加熱）の τ_{hd0} を初期液滴直径の関数として示している。図には、Fig. 4 の境界線近傍で爆発しなかった液滴のデータも含まれている。放射出力密度の大きい条件におけるデカン液滴の場合、 τ_{hd0} は単調に増大した。ドデカン液滴および放射出力密度が小さい条件でのデカン液滴の場合、 τ_{hd0} が極小値を示した。 τ_{hd0} が極小値を示す初期液滴直径は、放射出力密度が大きい条件ほど小さかった。図には示していないが、実験の初期液滴直径範囲においては、ヘプタン液滴の τ_{hd0} は放射出力密度の増大に伴って単調に増大した。初期直径が 1 mm のデカン液滴が 800 K の気圧雰囲気中で蒸発する場合の τ_{hd0} が 2.5 s であることより、初期液滴直径の大きい範囲では低い放射出力密度の条件においても初期加熱期間終了後の液滴温度がほぼ沸点であることが推察される。初期液滴直径の増大に伴って τ_{hd0} が急激に減少する初期液滴直径の範囲では、初期液滴直径の増大に伴って放射エネルギー吸収割合が増大し、液滴表面からの熱放出量と放射エネルギーの吸収量のつり合う液滴温度が高くなるため、液滴表面の蒸気圧が上昇し、 τ_{hd0} が減少すると考えられる。その後、 τ_{hd0} が増大するのは、放射吸収割合がほぼ一定になり、初期液滴直径の増大に伴って τ_{hd0} の間に蒸発する燃料の量が初期直径の 3 乗に比例して大きくなるのに対して放射エネルギーの吸収量は 2 乗でしか大きくならないためだと推察される。また、放射出力密度の低い条件では蒸発に時間を要するため、蒸発潜熱以外で液滴が放出する熱量の増大も τ_{hd0} を増大させる原因の一つと考えられる。 τ_{hd0} が極小値を示す初期液滴直径が放射出力密度の大きい条件ほど小さいのは、初期液滴直径が小さい範囲で液滴温度が沸点もしくはその放射出力密度の最大液滴温度に達して τ_{hd0} が極小となり、その後は初期液滴直径の増大に伴う放射エネルギー吸収割合の増大より τ_{hd0} の間に蒸発潜熱により消費される熱量の増大が上回って、 τ_{hd0} が増大したと考えられる。さらに初期液滴直径を小さくして実験を行えば、放射加熱の影響が雰囲気との熱伝達の影響に比べて無視できるくらい小さくなり、初期加熱期間終了時の液滴温度が下がって τ_{hd0} を示す曲線は無放射加熱蒸発の τ_{hd0} を示す破線に一致すると推察される。すなわち、初期液滴

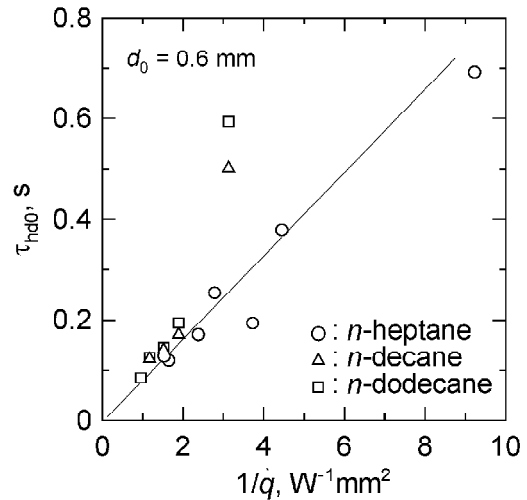


Fig.10 Relation between inverse of radiation power density and half diameter period without initial heat-up time.

直径の増大に伴って τ_{hd0} が急激に減少する初期液滴直径の範囲は、初期加熱期間終了時の液滴温度が沸点まで上昇する範囲であると考えられる。

τ_{hd0} と \dot{q} の逆数の関係を、初期液滴直径が 0.6 mm の液滴について Fig. 10 に示す。初期液滴直径が 0.6 mm の液滴の τ_{hd0} は、Fig. 9 のプロットを内挿して求めた。ヘプタン液滴の場合は図に示された \dot{q} の逆数の範囲において、デカン液滴とドデカン液滴の場合は約 2 W⁻¹mm² まで、 τ_{hd0} は \dot{q} の逆数の増大に比例して増大する。また、燃料種による τ_{hd0} の違いはあまり見られない。これは、放射エネルギーの吸収割合と密度、蒸発潜熱の積が燃料種によって大きな差がなく、吸収された放射エネルギーがほぼ全て蒸発潜熱に使われているからだと考えられる。 \dot{q} の逆数が大きくなると、すなわち放射出力密度が小さくなると、プロットは直線の上方に外れ、 τ_{hd0} が大きな値を示すようになる。これは、液滴温度が沸点に達しておらず、蒸発潜熱以外で液滴表面から奪われる熱エネルギーが吸収した放射エネルギーに対して相対的に大きいことが原因と考えられる。

4. 結言

炭酸ガスレーザを放射加熱源とし、ヘプタン、デカン、およびドデカン液滴の放射加熱蒸発および爆発を実験的に調べた。初期加熱期間後の液滴直径半減時間を液滴の放射加熱蒸発の速さを示す尺度として用いた。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 放射出力密度の高い条件では、初期液滴直径の大きな液滴に爆発現象が観察された。爆発限界は、沸点の高い燃料ほど、放射出力密度と初期液滴直径の大きい領域に存在する。
- 2) 初期液滴直径で無次元化した爆発液滴直径は、放射出力密度の増大に伴って増大し、1 に近づく。
- 3) 初期液滴直径が 0.6 mm 以上の場合、初期液滴直径で正規化された爆発誘導時間は、放射出力密度の逆数に比例し、同一放射出力密度においてその値は沸点の高い燃料の方が値が大きい。
- 4) 液滴直径が小さくなると、放射加熱の影響が小さくなる。
- 5) 初期加熱時間は、液滴直径の増大に伴って単調に増大する。
- 6) 放射出力密度が小さい条件では、液滴直径半減時間は、初期液滴直径が小さい範囲では減少し、極小値を示した後に増大する。放射出力密度が大きい条件では、液滴直径半減時間は単調に増大する。
- 7) 液滴直径半減時間が極小値を示す初期液滴直径は、放射出力密度が低い条件ほど大きい。
- 8) 放射出力密度の大きい条件では、液滴直径半減時間は放射出力密度の逆数にほぼ比例する。また、燃料種による値の違いはあまり見られない。

謝辞

本研究は、(独)日本学術振興会が交付する科学研究費の補助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。また、瀧川仁志氏には実験および論文作成でご助力頂きました。感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Williams, F. A.: Combustion Theory (Second Edition), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., California, 1985, 52-69.
- (2) Matlosz, R. L., Leipziger, S., and Torda, T. P.: Int. J. Heat Mass Transfer, 15(1972), 831-852.
- (3) 廣安博之, 角田敏一, 千田達郎, 今本敏彦: 機論 B, 40(1974), 3147-3154.
- (4) 角田敏一, 廣安博之: 機論, 42(1976), 1216-1223.
- (5) 野村浩司, 氏家康成: 機論 B, 61(1995), 1834-1840.
- (6) 野村浩司, 氏家康成: 機論 B, 61(1991), 4137-4143.
- (7) 廣光永兆, 川口 修: 機論 B, 63(1991), 1680-1692.
- (8) 齊藤武雄, 山崎浩司, Viskanta, R.: 機論 B, 57(1991), 1485-1490.

- (9) Kaji, T., Nakaya, S, Segawa, D., Kadota, T., and Tsue, M.: 6th Asia-Pacific Conference on combustion, D324 (2007).
- (10) 瀧川仁志, 野村浩司, 山崎博司, 氏家康成: 日本大学生産工学部研究報告, 39 (2006), 19-24.
- (11) Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E.: The Properties of Gases & Liquids (Fourth Edition), McGraw-Hill Book Company, New York, 1998.



野村 浩司
日本大学生産工学部 教授
〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1
Tel. 047-474-2356
Fax. 047-474-2349
e-mail: nomura@cit.nihon-u.ac.jp

略歴:1992年 東京大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了。同年日本大学生産工学部勤務。液滴燃焼, 噴霧燃焼, および火花点火機関の点火・燃焼機構に関する基礎研究に従事。



原 将史
日本大学生産工学研究科
〒275 8575 千葉県習志野市泉町 1 2 1
Tel. 047-474-2356
Fax. 047-474-2349
e-mail: c61310@cit.nihon-u.ac.jp

略歴:2006年 日本大学大学院生産工学研究科博士前期課程入学。放射加熱による燃料液滴の蒸発に関する研究に従事。



氏家 康成
日本大学生産工学部 教授
〒275 8575 千葉県習志野市泉町 1 2 1
Tel. 047 474 2323
Fax. 047-474-2349
e-mail: ujie@cit.nihon-u.ac.jp

略歴:1973年 日本大学大学院生産工学研究科修士課程修了。同年日本大学生産工学部勤務。ベンポンプ, 火花点火機関および圧縮点火機関の点火・燃焼機構に関する基礎研究に従事。