

炭酸ガスレーザを用いた液滴の放射加熱蒸発と爆発

日大生産工（院） ○原 将史 日大生産工 野村 浩司
日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

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は噴霧燃焼が採用されている。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、互いに影響しあうため、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の研究^[1]が行われてきた。実機において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、火炎からの強い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が、未だ放射加熱による燃料液滴蒸発の実験データは多くない^[1]。

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^[7]に及ぼす影響の解明を目的としている。自由液滴による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、単一懸垂液滴による実験を行った。本報では、液滴の放射加熱蒸発を初期加熱期間とそれ以降の期間に分けて調べ、揮発性の異なる試料液滴の放射エネルギーの吸収率について考察した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

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 $10.55 \sim 10.63 \mu\text{m}$ 、出力 35 W ）を用いた。放射出力密度 q を変化させるため、炭酸ガスレーザに焦点距離 95.25 mm の凸レンズを取り付け、レーザと液滴との距離を変化させた。放射出力はカロリーメータで計測した。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

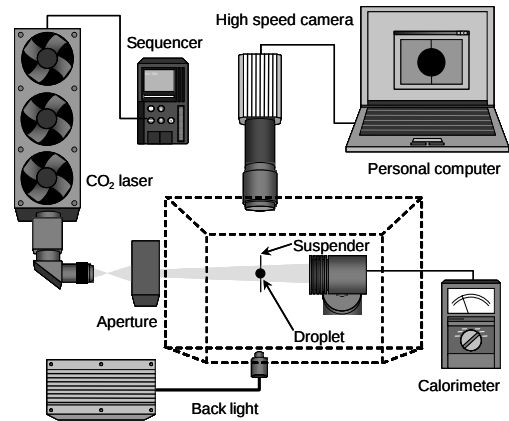
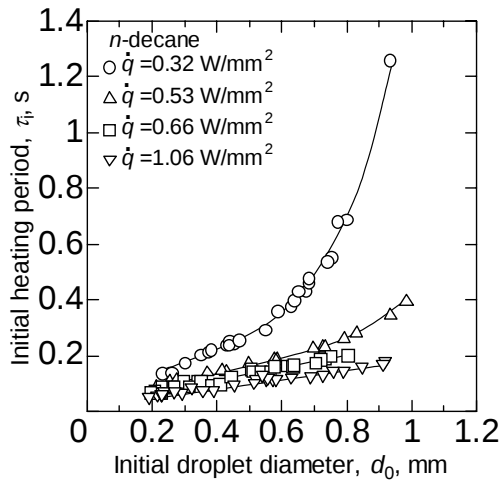


Fig.1 Experimental apparatus.

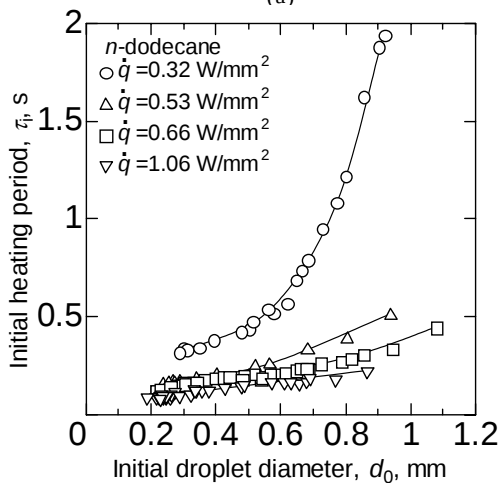
には、炭酸ガスレーザの放射エネルギーの99.4%を反射する金を用いた。懸垂線の長さは 14 mm であり、懸垂線が蒸発に及ぼす熱的影響^[2]を低減させるため、直径 $10 \mu\text{m}$ の線を使用し、直径 2 mm の穴を開けたアパーチャをレーザと懸垂液滴の間に設置して放射加熱範囲を制限した。アパーチャの材料には、放射エネルギーの透過、反射がない煉瓦を用いた。レーザの始動時出力不安定性を考慮し、暖機後に放射加熱を開始する。暖気中のレーザ光を遮断するため、ロータリーソレノイドと金属板を用いたシャッターを設けた。放射開始時刻を明確にするため、シャッターに位置センサを取付け、画像に赤色レーザによるマークを記録した。本報では、液滴の放射加熱蒸発を初期加熱期間とそれ以降の期間に分けて調べ、揮発性の異なる試料液滴の放射エネルギーの吸収率について考察した。実験は室温（ 300 K ）、大気圧で行った。試料には、純水（標準沸点： 373.15 K ）、正ヘプタン（ 371.6 K ）、正デカン（ 474.2 K ）および正ドデカン（ 489.2 K ）を用いた^[3]。

Experimental Study on Radiative Heating Evaporation and Explosion of Droplet Using a CO₂ Laser

Masafumi HARA, Hiroshi NOMURA and Yasushige Ujiie



(a)



(b)

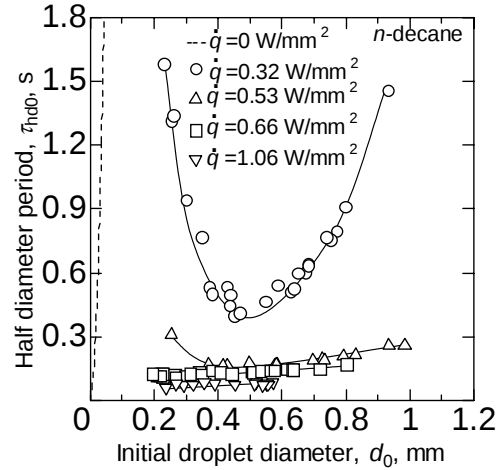
Fig.2 Relation between initial droplet diameter and initial heat-up time.

液滴観察装置として、高速度ビデオカメラ（露光時間：1, 8 ms, フレームスピード：60, 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。液滴直径の時間変化計測には、前報^[4]で詳細を記述した画像解析手法を用いた。液滴直径は、液滴と体積の等しい球の直径と定義した。本実験の液滴直径範囲では、液滴はほぼ球形であった。

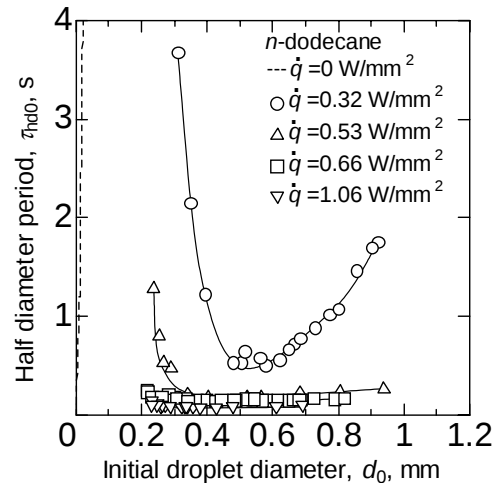
3. 結果および考察

3.1 放射加熱による蒸発

前報^[4]では、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} を放射加熱蒸発の速さの指標として用いたが、 τ_{hd} から初期加熱時間を除いた τ_{hd} 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



(a)



(b)

Fig.3 Relation between initial droplet diameter and half diameter period without initial heat-up time.

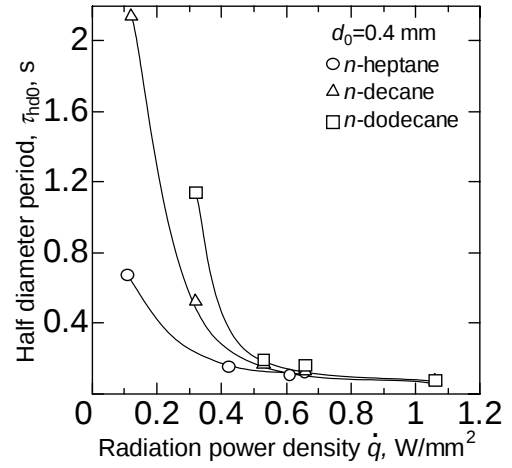
なるまでの時間と定義した。図2に初期加熱時間と初期液滴直径の関係をデカンおよびドデカンについて示す。初期加熱時間は、放射出力密度の増大に伴って単調に増大する。また、沸点の高い燃料ほど初期加熱時間が長いことがわかった。放射出力密度を変化させ、 τ_{hd0} と初期液滴直径の関係を調べた結果を図3に示す。デカンおよびドデカンは、放射出力密度が小さい条件で極小値を示した。 τ_{hd0} が極小値を示す初期液滴直径は、放射出力密度が低い条件ほど大きかった。初期液滴直径の増大に伴って τ_{hd0} が急激に減少する初期液滴直径の範囲は、対流熱伝達蒸発支配から放射加熱蒸発支配に遷移する範囲であり、体積的に放射エネルギーを吸収する試料の場合、 τ_{hd0} の間の放射エネルギーの吸収量に対して液滴表面からの熱放出量が初期液滴直径の増大に伴って相対的に小さくなるために τ_{hd0} が減少したと考えられる。その後、 τ_{hd0} が増大するのは、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増大するためである。 τ_{hd0} が

極小値を示す初期液滴直径が放射出力密度の低い条件ほど大きいのは、 τ_{hd0} の間の放射エネルギーの吸収量に対して液滴表面からの熱放出量が相対的に大きくなるため、液滴直径が大きい条件で放射加熱蒸発支配になるためと考えられる。 τ_{hd0} と $\dot{q}$ の関係を、初期直径0.4および0.7mmについて図4に示す。 $\dot{q}$ の式の増大に伴って、 τ_{hd0} は単調に減少する。 $\dot{q}$ が小さい範囲を除くと燃料による差はあまりみられないが、炭素数の大きい燃料ほど τ_{hd0} は大きくなっている。

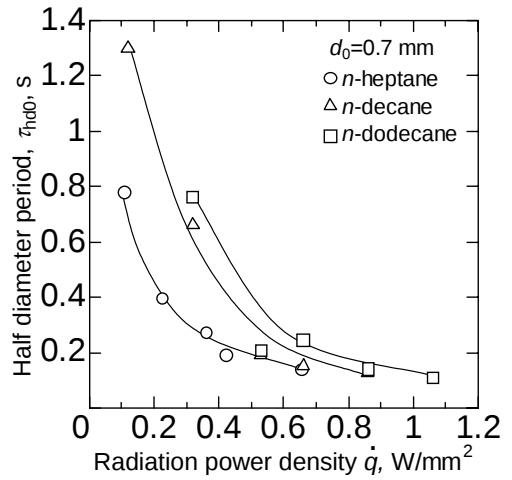
実験結果から液滴の放射エネルギー吸収率に及ぼす液滴直径の影響を考察する。放射加熱蒸発の場合、液滴温度は初期加熱期間で上昇し、その後降下する。吸収率を求めるためには温度・直径履歴および液滴表面からの熱放出速度履歴を考慮して算出する必要があるが、ここでは簡便に放射エネルギー吸収率に及ぼす液滴直径の影響を評価するため、次式のような液滴放射エネルギー吸収率評価値 $\bar{\eta}$ を定義し、用いた。

$$\begin{aligned}\bar{\eta} &= \frac{\pi}{6} \left\{ d_0^3 - \left(\frac{d_0}{2} \right)^3 \right\} \rho_b L_b \left/ \frac{\pi}{4} \dot{q} \left\{ d_0^2 \tau_i + \int_0^{\tau_{hd0}} \left(d_0 - \frac{d_0}{2\tau_{hd0}} t \right)^2 dt \right\} \right. \\ &= \frac{7}{12} d_0 \rho_b L_b \left/ \dot{q} \left\{ \tau_i + \frac{7\tau_{hd0}}{12} \right\} \right. \\ &= d_0 \rho_b L_b \left/ \dot{q} \left\{ \frac{5}{7} \tau_i + \tau_{hd} \right\} \right.\end{aligned}\quad (1)$$

あここで ρ_b および L_b は、それぞれ標準沸点における液滴の密度および蒸発潜熱である。 $\bar{\eta}$ は、液滴直径が初期加熱期間では一定であり初期加熱期間以降では直線的に減少する、吸収した放射エネルギーは全て蒸発潜熱で消費される、として求めた平均吸収率である。各燃料の放射出力密度が大きい2つの条件、すなわち放射加熱蒸発が支配的だと考えられる条件について $\bar{\eta}$ を算出した。 $\bar{\eta}$ を d_0 の関数として表した結果を全試料について図5に示す。 $\bar{\eta}$ は、初期液滴直径の増大に伴い単調に増大することがわかる。これは、放射光が液滴内部を通過する距離が長くなるためだと考えられる。デカンとドデカンについては $\bar{\eta}$ が1に近づく前に一定値に漸近する傾向がみられる。これは、液滴の放射加熱蒸発では液滴直径の増大に伴って平衡する液滴温度が上昇するため、蒸発潜熱以外での熱放出が増大すること、および液滴直径が初期直径の半分になった時点での液滴温度と室温の差が増大することなどが原因と考えられる。 $\bar{\eta}$ は炭素数が多くなると減少することがわかった。純水について $\bar{\eta}$ が1を超えることが確認された。これは液滴直径よりもレーザ直径が大きいため、液滴への入熱が液滴の投影面積だけで



(a)



(b)

Fig.4 Relation between radiation power density and half diameter period without initial heat-up time.

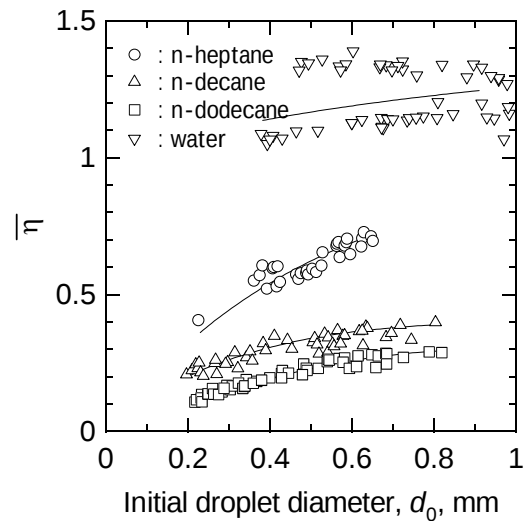


Fig.5 Relation between $\bar{\eta}$ and initial droplet diameter.

なく、液滴周囲の蒸気が加熱され、その熱が液滴蒸発を促進させたと考えられる。

3.2 水蒸気が吸収率に及ぼす影響

放射エネルギーの吸収が多い水蒸気を用い、デカン液滴周囲の水蒸気モル分率を変化させ、液滴周囲の蒸気が液滴蒸発速度に及ぼす影響について調べた。液滴試料にデカンを選んだのは、蒸発が液滴周囲の水蒸気モル分率の影響を受けにくく、また水液滴の $\bar{r}$ が1を超える放射出力密度で液滴表面温度が沸点に達していないと考えられたからである。液滴周囲の温度調節には、長さ30 mm、直径25.4 mmのステンレス管で覆いテープヒータで加熱した。蒸気生成には、純水の入った容器を液滴の真下に設置した。それぞれ熱電対で温度計測し、液滴周囲温度と蒸気温度が同じになるように制御した。実験結果を図6に示す。液滴周囲がその温度の飽和蒸気の場合 τ_{hd0s} と蒸気なしの場合 τ_{hd0} の比は、水蒸気モル分率の増大と共に1より小さくなり、減少している。このことから、液滴周囲の水蒸気が放射エネルギーを吸収することで、液滴を加熱し、液滴の蒸発速度が大きくなったため、計算上の $\bar{r}$ が1を超えたと考えられる。

3.3 爆発特性

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。本報では、爆発直前の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。図7は、初期液滴直径 d_0 で正規化した爆発誘導時間 τ_{ex} 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った。

4. 結言

液滴の放射加熱蒸発の速さを示す尺度として新たな液滴直径半減時間を定義し、ヘプタン、デカンおよびドデカンについて液滴の放射加熱蒸発に及ぼす放射出力密度の影響を調べた。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 液滴直径が小さくなると、放射加熱の影響が小さくなる。
- 2) 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。
- 3) 放射出力密度が小さい場合、液滴直径が初期液滴直径の半分になるまでの時間は、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。

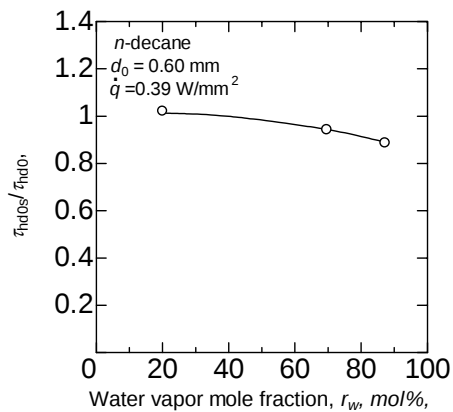


Fig.6 Effect water vapor on radiative heat of n-decane.

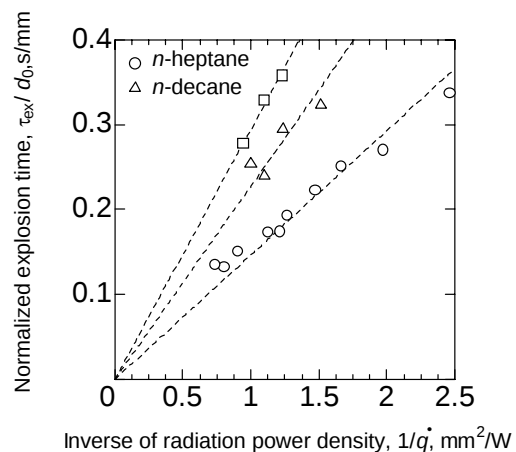


Fig.7 Relation between inverse of radiation power density and normalized explosion time.

- 4) 液滴直径が初期液滴直径の半分になるまでの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。
- 5) 放射加熱蒸発における液滴の放射エネルギーの吸収率は、初期液滴直径の増大に伴って大きくなり、炭素数の増大に伴って小さくなる傾向を示すことが示唆された。
- 6) 液滴周囲の蒸気が放射エネルギーを吸収し、その蒸気が液滴を加熱することで、液滴の蒸発速度が大きくなる可能性が示唆された。

参考文献

- (1) T. Kaji, S. Nakaya, D. Segawa, T. Kadota, M. Tsue, 6th Asia-Pacific Conference on combustion, D324 (2007)
- (2) 瀧川 仁志, 野村 浩司, 氏家 康成, 第13回微粒化シンポジウム講演論文集, pp. 151-154 (2004)
- (3) 中西 香爾, 有機化学(上)第6版, pp. 121.(1994)
- (4) 原 将史・野村 浩司・氏家 康成, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.450-451(2006)
- (5) 廣光 永兆・川口 修, 日本機械学会論文集(B編)63巻609号 pp. 1687-1692 (1997)