

平成21年 5月25日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560213

研究課題名（和文） 放射加熱による燃料液滴の蒸発・爆発の実験および数値解析

研究課題名（英文） Experiments and Numerical Simulation on Fuel Droplet Evaporation and Explosion Caused by Radiation Heating

研究代表者

野村 浩司 (NOMURA HIROSHI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：30246847

研究成果の概要：

炭酸ガスレーザーを放射加熱源とし、ヘプタン、デカン、ドデカン、エタノール、および水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。放射出力密度の高い条件では、ヘプタン、デカンおよびドデカン液滴に、初期液滴直径が大きい場合に爆発現象が観察された。放射加熱蒸発の数値シミュレーションを行うため、液滴の放射エネルギー吸収割合を実験的に見積もった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：燃焼，蒸発，放射エネルギー，噴霧，微小重力環境

1. 研究開始当初の背景

燃焼過程における放射の影響は、無視されることが多かった。しかしながら、数値計算の進展や、希薄燃焼の実用化にともなう燃焼限界の知見の拡大により、放射が燃焼過程で重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。

2. 研究の目的

噴霧燃焼過程において火炎からの放射が液滴蒸発に及ぼす影響について、大気圧霧囲気および火炎からの放射が強くなる高圧力

霧囲気で調べる。実機の燃焼圧力が燃料の臨界圧力を超えている場合が多いことを考慮し、亜臨界圧力から超臨界圧力霧囲気まで、実験を行う。蒸発挙動と蒸発速度に及ぼす放射エネルギー密度と初期液滴直径の影響を実験的に明らかにする。結果を考察することにより、簡便かつ適切な数値モデルを作成し、現象の詳細な考察を行う。

3. 研究の方法

図1に大気圧実験用装置概略を示す。放射加熱源として、CO₂レーザー（中心波長 10.6

μm)を用いた。これは、火炎からの放射には二酸化炭素からの放射が多く含まれていること、ほぼ単一波長なので実験結果の解析が行いやすいことなどの理由による。液滴を懸垂する懸垂線には、CO₂レーザの放射をほぼ100%反射する金線(直径10 μm)を用いた。X字型懸垂線に初期液滴直径0.6 mmの液滴を懸垂した。高压雰囲気でも放射加熱実験が行える装置を製作した。高压容器内部に挿入するモジュール(懸垂線、懸垂線移動装置および液滴生成装置)概略を図2に示す。液滴の生成を遠隔操作で行えるようにした。高压雰囲気での液滴蒸発は自然対流の影響を大きく受ける。また、液滴が臨界状態に近づくと、懸垂線への付着力が低下し、落下してしまう問題がある。通常重力環境での実験と平行して、微小重力環境での蒸発実験のために、微小重力実験用装置を設計・製作した。微小重力実験装置概略を図3に示す。前述のモジュールを高压容器内部に設置した。バッテリーおよびCO₂レーザは、実験装置の上にプラットフォームを設け、設置することとした。得られた実験結果から、放射級数割合に関して半実験式を導き出し、液滴蒸発シミュレーションプログラムに組み込み、放射加熱蒸発に関する数値シミュレーションを行った。

4. 研究成果

炭酸ガスレーザを放射加熱源とし、ヘプタン、デカン、ドデカン、エタノール、および水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。放射出力密度の高い条件では、ヘプタン、デカンおよびドデカン液滴に、初期液滴直径が大きい場合に爆発現象が観察された。放射加熱蒸発の数値シミュレーションを行うため、液滴の放射エネルギー吸収割合を実験的に見積もった。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にはほぼ一定であることがわかった。放射加熱蒸発の数値シミュレーションにおいては、液滴直径が0.6 mm以下まで計算をする必要があるため、吸収割合について後述の半実験式を仮定して計算を行い、液滴直径履歴を求めた。この点については改善の余地があると考えている。

高压力雰囲気実験においては、微小重力環境で放射加熱蒸発実験を行うための実験装置を完成させた。観察用窓ガラスでの放射エネルギー吸収が大きく、2.5 sの微小重力時間(COSMOTORE 落下塔、北海道赤平市)で蒸発が完了するような実験はできなかった。この点は今後の課題である。放射加熱蒸発の

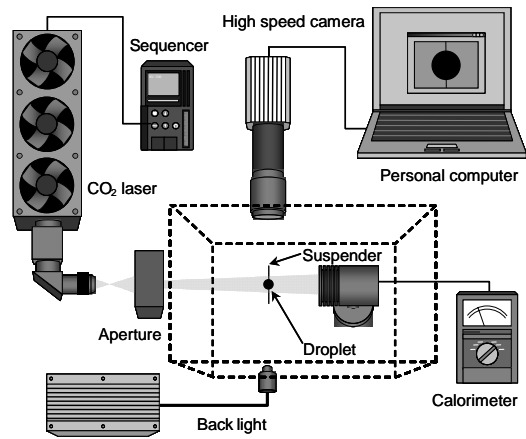


図1 実験装置.

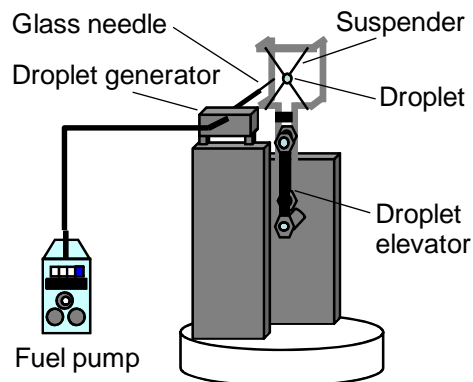


図2 高压容器内部モジュール.

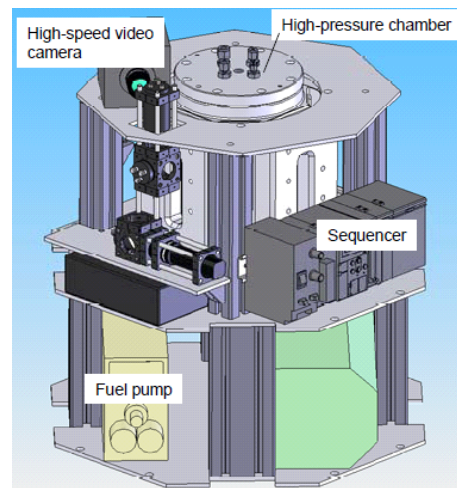


図3 微小重力実験装置.

参照データとして有用な、高温高压雰囲気液滴蒸発データをデカンおよびヘキサデカンについて、2.5 sの微小重力実験で取得した。

(1) 放射加熱による燃料液滴の爆発

図3に、放射出力密度が1.25 W/mm²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度ビデオカメラ（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。

図5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。水およびエタノールを資料として用いた場合には，本研究の液滴初期直径および放射出力密度の範囲において，爆発は観察されなかった。

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。図6は，図5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部の温度上昇が促進されていると推察される。

図7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

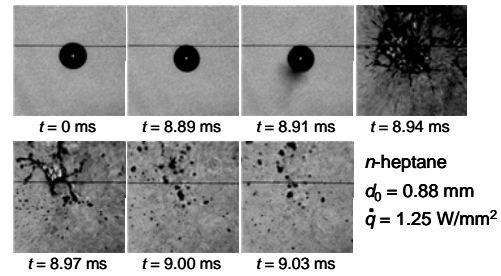


図4 放射加熱により爆発するヘプタン液滴。

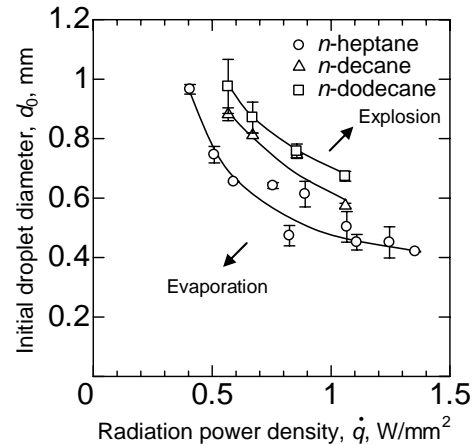


図5 爆発限界。

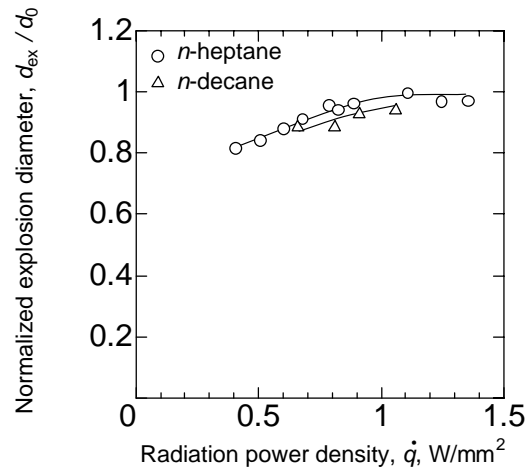


図6 初期直径で正規化した爆発直径と放射出力密度の関係。

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がわかる。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。

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

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

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

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、図7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にはほぼ一定であることがわかった。同様な傾向は、他研究者の放射エネルギー吸収割合の数値計算に関する報告にも示されている。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、図7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。

(2) 放射加熱による燃料液滴の蒸発

図8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

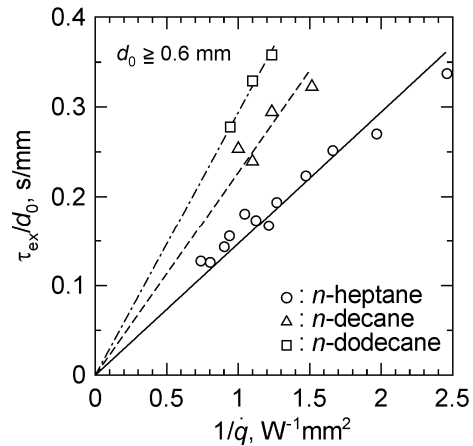


図7 初期液滴直径の2乗で正規化された爆発誘導時間と放射出力密度の逆数の関係。

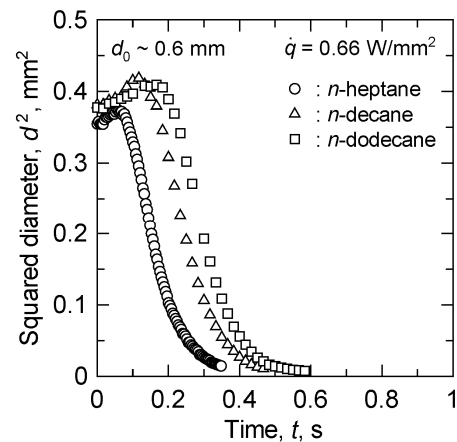


図8 液滴直径の2乗の履歴。

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_{hd0} （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。図9に初期加熱時間と初期液滴直径の関係を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。

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

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。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の関係を調べた結果をデカンについて図10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、図5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。放射出力密度が小さい条件では、 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の大気圧静止雰囲気蒸発する場合の 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

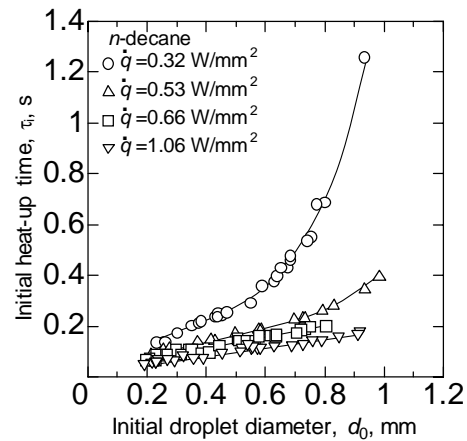


図9 初期加熱時間と初期液滴直径の関係。

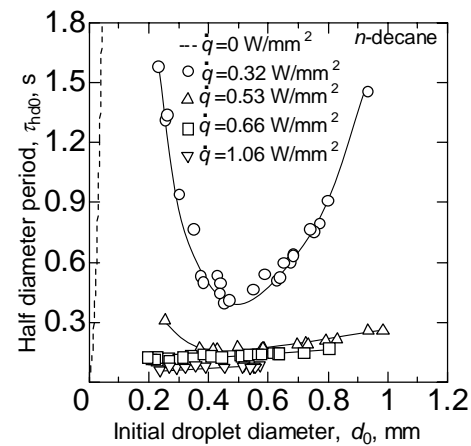


図10 液滴直径半減時間と初期液滴直径の関係。

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の液滴について図11に示す。初期液滴直径が0.6 mmの液滴の τ_{hd0} は、図10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 $2 \text{ W}^{-1}\text{mm}^2$ 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。

(3) 放射加熱蒸発のシミュレーション

実験結果を元に、放射加熱割合 η_r の半実験式を考案し、放射加熱蒸発の数値モデルの構築を試みた。用いた放射加熱割合の式は、

$$\eta_r = \eta_\infty (1 - e^{-\varepsilon d}) \quad (4)$$

とした。ここで、 η_∞ は液滴直径が十分に大きい場合の放射加熱割合であり、 ε は定数である。

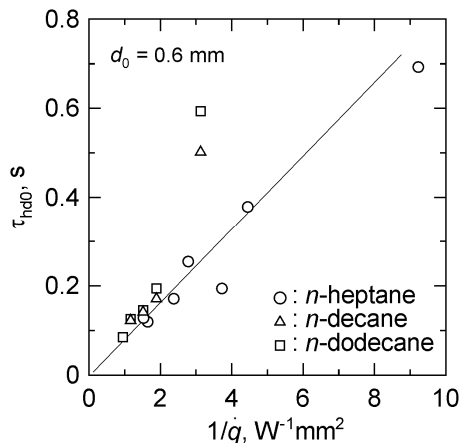


図 11 液滴直径半減時間と放射出力密度の逆数の関係。

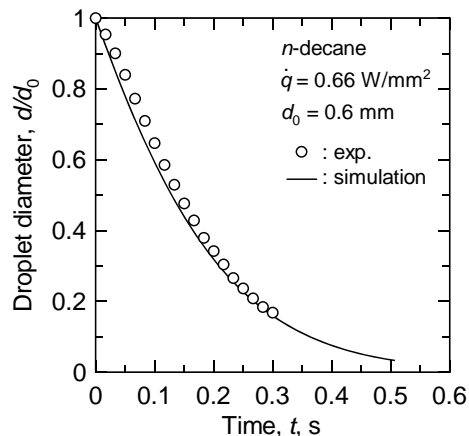


図 12 液滴直径履歴の実験結果とシミュレーション結果の比較。

る。両定数とも、現段階では実験結果から推定した値を用いてシミュレーションを行っている。デカン液滴について、初期加熱期間以降のシミュレーションを行った結果の一例を図 12 に示す。 η_∞ は、実験結果から 0.7 とした。 ε を適切に選べば、液滴直径履歴を定性的に良く表すことができる。 ε の適切な決め方と非定常性が強い初期加熱期間の数値モデル化の検討を今後の課題とする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 鈴木真人, 野村浩司, 橋本望, 氏家康成, バイオマス燃料液滴の蒸発・燃焼と微小重力実験装置の開発, 日本液体微粒化学会誌微粒化, Vol. 17, No. 58, pp. 38-44, 2008, 査読有。
- ② 野村浩司, 原 将史, 氏家康成, 放射加熱による単一懸垂燃料液滴の蒸発と爆発, 日本液体微粒化学会誌微粒化, Vol. 17, No. 57, pp. 3-9, 2008, 査読有。

[学会発表] (計 2 件)

- ① 野村浩司, 高圧環境下における点火・燃焼現象解明のための共通微小重力実験装置を用いた研究の報告, 第 24 回宇宙利用シンポジウム, 2009 年 1 月 15 日, 相模原。
- ② 野村浩司, 放射加熱による単一懸垂液滴の蒸発実験と放射吸収率の考察, 第 45 回燃焼シンポジウム, 2007 年 12 月 5 日, 仙台。

[その他]

ホームページ

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/IA/0004420/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 浩司 (NOMURA HIROSHI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 30246847

(2) 連携研究者

氏家 康成 (UJIIE YASUSHIGE)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 20060197