微小重力環境を利用した乳化燃料液滴火炎内すす濃度場の可視化*

瀬川大資^{*1}, 津江光洋^{*2}, 角田敏一^{*1}
山崎博司^{*3}, 河野通方^{*2}Visualization of Sooting Field in an Emulsion Droplet Flame
by using Microgravity EnvironmentDaisuke SEGAWA, Mitsuhiro TSUE, Toshikazu KADOTA^{*4},
Hiroshi YAMASAKI and Michikata KONO^{*4} Osaka Prefecture University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka, 599-8531, Japan

Sooting field in a flame formed around a suspended droplet was visualized under microgravity using the planar laser light scattering technique. The soot concentration and the instantaneous soot amount were approximately estimated from the intensity of the scattered light using the image analysis system. The fuels employed were water-in-oil emulsions composed of *n*-dodecane, water and surfactant. The water content was varied from 0 to 0.2 in volume. A soot layer which was concentric with the droplet was observed inside the luminous flame. The results show the unsteadiness of the sooting behavior as well as the flame behavior. The maximum of the soot concentration is located near the inner edge of the soot layer. The time history of the instantaneous soot amount is similar to that of the instantaneous flame radius. The maximum of the soot concentration does not vary with the water content, while the soot amount decreases significantly with the water emulsification.

Key Words: Liquid Fuel, Combustion, Combustion Products, Soot, Emulsified Fuel, Droplet Combustion, Microgravity

1. 緒 言

代替燃料として注目されているものの一つとして、液体燃料に水を混ぜた、いわゆる乳化燃料が挙げられる。乳化燃料の燃焼に特有な現象は、蒸気と微小液滴との吹出し現象(パフィン⁽¹⁾)や、液滴の分裂、マイクロ爆発などの二次微粒化現象である。これらの現象により、実用燃焼器においては、乳化燃料を利用することで燃焼効率が向上するとともに、未燃炭化水素およびすすが低減すると期待されている。さらに、燃料とともに蒸発する水により火炎温度が低下し、窒素酸化物の生成が抑制される可能性があるといわれている⁽²⁾。このため、従来より乳化燃料の燃焼に関する研究が多く行われてきており^{(3)~(8)}、著者らもこれまでに、すすの低減機構や二次微粒化現象に関する、基礎的な研究を行ってきている^{(9)~(15)}。しかしながら、その燃焼過程は十分に解明されているとはいえない。

実用燃焼器の燃料噴霧内では、個々の微小燃料液滴

が周囲気体中に浮遊して燃焼していることから、その燃焼過程に及ぼす対流の影響は小さく、球対称の燃焼場が形成されていると考えられている。この液滴燃焼現象を模擬して詳細を明らかにするため、自然対流の起こらない微小重力環境を利用することで実現される、観察の容易な直径1 mm前後の燃料液滴の球対称燃焼場を対象とした、実験的研究が行われてきている。その中で、パラフィン系炭化水素燃料などの液滴火炎において、火炎内側の比較的液滴に近い位置に、球殻状の形状をもつすす層(すす殻)が形成されることが示され⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、さらにすす殻位置の経時変化が明らかにされている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。ただし、すす殻は液滴の照明方法に注意を払って直接撮影により可視化されたものであり、液滴火炎内で生成されるすすの詳細な挙動は明らかにされていない。これは、微小重力実験では寸法や装置強度の制約があり、地上実験におけるすす計測で一般的なレーザ応用計測装置の利用が、困難だったためである。

そこで、本研究では、すす低減効果があると考えられている乳化燃料について、噴霧燃焼時におけるすす生成挙動を明らかにすることを目標に、その第1段階として、微小重力下における乳化燃料液滴火炎内のすす濃度場の可視化を試みた。すすの可視化には平面レ

* 原稿受付 1998年9月7日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部 (〒599-8531 堺市学園町1-1)。^{*2} 正員、東京大学工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*3} 正員、愛媛大学教育学部 (〒790-8577 松山市文京町3)。

E-mail: kadota@energy.osakafu-u.ac.jp

ーザ光散乱法を利用することにした。このため、微小重力実験で使用できるような小形で頑丈な計測装置を開発した。そして、微小重力実験により得られた散乱光像を画像処理することにより、すす濃度分布およびすす量を推定し、それらに及ぼす乳化燃料の含水率の影響について考察した。これまでに得られた実験結果について、ここに報告する。

2. 実験装置および実験方法

良好な微小重力環境を得るため、本研究では日本地下無重力実験センター(JAMIC)の落下施設(自由落下距離 490 m, 落下時間 10 s)を利用して実験を行った。本研究で用いた実験装置の構成を、図1に示す。すすの可視化に利用した平面レーザ光散乱法のための、レーザ、光学レンズ、スリット、干渉フィルタ、ビデオカメラなどの光学装置、および乳化燃料液滴を自動的に生成・燃焼させるための燃焼容器、液滴生成装置などで構成されている。

2・1 平面レーザ光散乱法 光源には、寸法の制約から、小形 Nd:YAG 連続光レーザの第2高調波(波長 532 nm, 出力 100 mW)を利用した。レーザからのビーム光は、円筒面レンズ、球面レンズおよび縦スリットを経て高さ約 15 mm, 厚さ約 0.2 mm のシ

ート光となり、図2に示されるように懸垂液滴の真下を通過するように液滴火炎に照射される。火炎内のすすからの散乱光像は、球面レンズ、ハーフミラーおよび干渉フィルタを介して、シート光の側方、つまりシート面に垂直な方向からビデオカメラで撮影した。したがって、本実験では液滴中心を通る鉛直断面内のすすのうち、液滴より下方の火炎内に存在するすすからの散乱光像が得られる。干渉フィルタは、火炎の自発光の影響を減ずるために用いた。また、もう1台のビデオカメラを用いて、液滴火炎の直接像も同時に撮影した。散乱光像および直接像の撮影露光時間は、それぞれ 0.1 ms および 4 ms, 撮影間隔はともに 33 ms である。

すす粒子群からの散乱光強度は、すすの粒度分布および数密度のほか、すす粒子の形状や複素屈折率など、さまざまな因子の影響を受ける。これらの影響については不明な点も多く、散乱光像からすすの濃度分布を定量化するのは困難である。しかしながら、すす粒子を球形と仮定すると、散乱光強度は Mie 散乱理論によりすすの粒度分布、数密度および複素屈折率の関数として導出される。さらに、すす粒径と複素屈折率が一定であると仮定し、多重散乱の影響を無視すると、散乱光強度がすすの数密度(すす濃度)に比例するとみなすことができる⁽²⁰⁾。そこで、本研究では、得られた散乱光像を画像処理することによって散乱光強度分布を求め、これを用いて火炎内のすす濃度分布を定性的に評価した。

2・2 液滴燃焼実験装置 燃焼容器はアクリル樹脂製で、容器側面にはレーザ光入射や液滴撮影などのための開口部が設けられている。容器上面には、燃料液滴を懸垂させる石英線が下向きに取付けられている。石英線の直径は 0.25 mm で、液滴が保持される先端部は直径約 1.3 mm の球状に加工されている。燃料液滴は、液滴生成装置によって落下実験開始の約 60 s 前に石英線端部に懸垂した。液滴生成装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Planar laser light scattering technique

Fig. 3 Fuel supply system

を、図3に示す。液滴生成装置は、長さ100 mm、外径0.6 mmの皮下注射針、注射針移動のためのラックピニオンギアとステッピングモータ、注射器、注射器ピストンを押すためのラックピニオンギアとステッピングモータ、ステッピングモータ制御のための駆動回路と小形コンピュータなどにより構成されている。液滴を生成する際には、注射針をその先端の方向に移動させて、石英線の先端球よりわずかに上の部分に注射針先端の開口部を接触させる。そして、注射器ピストンを押し注射器内の燃料を注射針先端から微量押し出すと、燃料が注射針先端と石英線との両方に付着する。そのあと注射針を引き戻すと、燃料は注射針から離れ、石英線先端部に保持される。本実験では、液滴の初期半径 r_{d0} を 1.0 ± 0.1 mm とした。ただし、界面張力の影響により懸垂された液滴は球形にはならず、石英線の軸方向に引き延ばされた形状となるため、液滴の形状を回転だ円体とみなし、画像から測定した長径と短径を用いて算出した体積と同じ体積となる球の半径を、液滴の半径としている。液滴の着火は、ニクロム線を電気加熱して行った。液滴側方に配置されたニクロム線は落下実験開始直後に加熱され、その約3 s後に液滴が着火する。本実験では、大気圧・室温の空気雰囲気中で燃料液滴を燃焼させたが、いずれの場合においても微小重力環境が実現されている10 s以内に燃焼が終了した。なお、液滴の初期半径を測定するために、液滴を生成する際には、燃焼容器横に取付けたランプを点灯したが、散乱光像および直接像の撮影に支障をきたさないよう、落下実験の際には消灯した。

以上に説明した実験装置はすべて、JAMICの実験用1/4ラック(縦425 mm、幅870 mm、高さ425 mm)に取付けた。実験装置の配置を、図4に示す。

2・3 乳化燃料 本実験では、*n*-ドデカンベース燃料とする乳化燃料を用いた。乳化剤には非イオン

性界面活性剤のソルビタンモノオレエート(Rheodol SP-O 10, 花王, HLB=4.3)を用いた。したがって、油中水滴型の乳化燃料が得られる。ベース燃料、純水および乳化剤を所定の比率で混合し、マグネティックスターラで24 hかくはんして乳化燃料を作成した。また、乳化燃料に溶け込んだ気体の影響⁽⁹⁾⁽¹¹⁾をできる限り小さくするため、減圧脱気を2 h以上行った後に実験に供した。乳化剤の混合比率は、体積分率で0.01とした。本実験では、体積分率で表した含水率 c_w が0.1および0.2の乳化燃料と、純粋燃料($c_w=0$)を実験対象とした。

3. 実験結果および考察

本実験では、含水率が0.2までの油中水滴型乳化燃料の液滴を着火・燃焼させたが、マイクロ爆発は燃焼終了まで発生しなかった。そして、着火の0.5 s後あたりから燃焼終了まで、パフリングが間欠的に発生した。パフリングが発生すると、液滴火炎や散乱光像が一時的にゆがめられる様子が観察された。しかしながら、火炎形状や散乱光像(すす濃度分布)の球対称性が、パフリングにより大きく損なわれることはなかった。

燃料が*n*-ドデカンの純粋燃料の場合に撮影された、燃焼初期の直接像および散乱光像を、図5に例示する。図5(a)の直接像には、液滴火炎の自発光像とすすからの散乱光像とが同時に示されており、レーザーシート光の通過しない部分が自発光像である。図5より、液滴を中心とした円弧状の領域から散乱光が発せられていることが確認できる。このことから、液滴の近傍にはすすは存在せず、液滴を中心とした、厚みのある球殻状のすす層が形成されていると考えられる。一方、散乱光像と直接像を比較すると、散乱光像が確認される領域の外縁、つまりすす層の外縁は、輝炎の外縁とほぼ一致していることがわかる。本実験では、いずれの場合においても図5と同様な画像が得られ

Fig. 4 Falling assembly

(a) Direct image (b) Scattered light image

Fig. 5 Direct image and scattered light image of a droplet flame (pure *n*-dodecane droplet, $t/t_b=0.18$)

た。

球殻状のすす層が液滴火炎内に形成されるのは、以下のような機構によるものと考えられる。液滴から蒸発した燃料は、拡散とステファン流によって火炎へ近づく。この燃料は高温の火炎付近において熱分解し、その一部はすす核からすす粒子へと成長する。こうして生成されたすす粒子の中で、小さなものはそのあと火炎を通過して酸化されるが、比較的大きなものは熱泳動の効果により、液滴の方向へ引き戻される。そして、ステファン流による流体抵抗力(火炎へ近づく方向)と熱泳動力(火炎から遠ざかる方向)とが釣り合う位置に、大きなすす粒子が滞留する⁽¹⁷⁾。その結果、液滴火炎内部の球殻状の領域に、この大きなすす粒子と、ステファン流によって火炎へ移動している小さなすす粒子が存在することになり、球対称のすす層が形成される。

なお、図5からわかるように、レーザシート光はこの画像の右方より入射しているが、画像左側からの散乱光も十分に強いことから、すす層におけるすすの濃度は、シート光をさえぎる程度までには高くないと考えられる。

3・1 散乱光強度分布 以上のようにして得られた散乱光像を画像処理し、散乱光強度の半径方向分布を導出した。ただし、図5(b)からわかるように、散乱光像は完全には点対称とならない。そこで、画像処理する際に、散乱光強度の半径方向分布を複数の方向について導出し、それを平均している。純粋燃料のときに得られた散乱光強度分布を、図6に示す。図6の横軸は、液滴の中心からの距離である。また、図6中の t/t_b は、着火からの経過時間 t を、着火から輝炎消失までの燃焼時間 t_b で除して無次元化したものである。

Fig. 6 Radial distribution of scattered light intensity for pure *n*-dodecane droplet

る。無次元時間 $t/t_b=0.25$ の燃焼初期においては、散乱光強度は液滴から離れるにつれて徐々に増大して、極大値を示している。しかしながら、燃焼中期から後期にかけては、散乱光強度が極大値まで急しゅんに増大するようになる。一方、極大値を示す位置より外側においては、距離の増加とともに散乱光強度はなだらかに減少しており、その分布形状は燃焼初期から後期まで、ほぼ同じである。つまり、燃焼中期以降は、液滴火炎内に形成されるすす層の内縁付近において、すす濃度が極大になっていると推測される。この結果は、通常重力下において、液滴下方よどみ点付近の液滴火炎内のすす濃度分布を、レーザ光散乱法および透過光減衰法を利用して測定した Kadota-Hiroyasu の結果⁽²¹⁾ と、定性的に一致している。

散乱光強度の極大値は、燃焼中期までは時間の経過とともに増大している。そして、燃焼後期においては逆に、時間の経過とともに散乱光強度の極大値が減少している。また、散乱光強度が極大値を示す半径(液滴中心からの距離)は、4.5 mm 前後となっている。ただし、燃焼初期においてはその半径が増大し、極大値を示したあとは減少する傾向を示している。一方、すす殻に着目した従来の研究では、以下のようなことが示されている。Hara-Kumagai⁽¹⁸⁾ の *n*-ヘプタン液滴についての実験結果において、すす殻直径は、燃焼初期においては時間の経過とともにわずかに増大し、その後極大値を示してからなだらかに減少している。また、Shaw ら⁽¹⁶⁾ は *n*-デカン液滴を用いて実験を行っており、燃焼初期にはすす殻直径が増大すると報告している。これは、Hara-Kumagai の結果と定性的に一致している。一方、*n*-ヘプタン液滴を対象とした Jackson-Avedisian⁽¹⁹⁾ の実験報告では、燃焼中期以降の結果が示されている。そのときのすす殻直径は、時間の経過とともに減少しており、この結果も Hara-Kumagai の結果と定性的に一致している。以上のことから、従来の研究におけるすす殻直径の経時変化と、本研究において散乱光強度が極大値を示す半径の経時変化との間には、類似性が認められる。

燃料を含水率 $c_w=0.1$ および 0.2 の乳化燃料としたときの散乱光強度分布を、それぞれ図7、8に示す。図6と比較するとわかるように、分布曲線が同じ形状となる無次元時間 t/t_b にはずれが認められるものの、全燃焼期間をとおした分布曲線の形状変化の様子はほぼ同様である。また、散乱光強度の極大値にも、明確な違いは見られない。したがって、液滴火炎内に形成されるすす層のすす濃度は、乳化燃料の含水率の影響をあまり受けないものと推測される。ただし、図6～8

Fig. 7 Radial distribution of scattered light intensity for emulsion droplet with water content of 0.1

Fig. 8 Radial distribution of scattered light intensity for emulsion droplet with water content of 0.2

からわかるように、すす層は含水率の増加とともに液滴に近づき、その径は小さくなる傾向を示している。

3・2 すす層の存在領域 すす層の存在する領域の経時変化を、図9に示す。図9の縦軸は、液滴中心からすす層の内縁までの距離(内縁半径) r_i および外縁までの距離(外縁半径) r_o それぞれを、液滴半径 r_d で無次元化した値を示している。ここで、すす層の内縁および外縁は、散乱光強度が極大値の5%まで小さくなる位置と定義し、散乱光強度分布を曲線近似して推定している。また、いわゆる d^2 則、

$$r_d^2 = r_{d0}^2 - Kt/4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K = 4(r_{d0}^2 - r_{d1}^2)/t_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つと仮定し、液滴半径 r_d を求めている。式(2)の r_{d1} は消炎時の液滴半径であり、ここでは石英線の先端球の半径(=0.65 mm)とした。

図9より、いずれの場合にも、すす層の無次元内縁半径はほぼ単調に増加している。それに対し、すす層

Fig. 9 Temporal variation of inner and outer radii of soot layer normalized by instantaneous droplet radius

の無次元外縁半径は、燃焼初期には急速に増加するが、その増加率は徐々に低下する。そして、ほぼ一定となった後に、無次元外縁半径はわずかな減少傾向を示す。したがって、すす層の存在する領域は、燃焼初期に急速に広がり、その後、燃焼中期から後期にかけて狭くなる。このことは、液滴火炎中のすす層の挙動が非定常なものであることを示している。

含水率 $c_w=0.1$ の乳化燃料の場合、内縁半径の経時変化は、純粋燃料の場合とほぼ一致している。また、外縁半径は、燃焼初期においては純粋燃料の場合と同様な変化を示すが、燃焼中期～終期においては純粋燃料の場合よりも小さくなる。なお、燃焼初期においては、間欠的なパフイングの開始によって、内縁・外縁半径の一時的な変化が現れている。一方、含水率 $c_w=0.2$ の場合の内縁半径および外縁半径は、燃焼初期のある時点($t/t_b \sim 0.2$)で一度、急激に減少している。図8中の $t/t_b=0.25$ における散乱光強度分布は、その直後のものであり、液滴近くに低濃度のすす層が形成されていることがわかる。それ以降の内縁半径および外縁半径は、含水率 $c_w=0.1$ の乳化燃料および純粋燃料の場合と同様な傾向で変化している。ただし、燃焼中期においては他の場合よりも小さな値を示しており、燃焼後期に含水率 $c_w=0.1$ の場合と同程度となっている。一方、すす層の濃度は図8に示されるように、燃焼中期から燃焼後期において他の場合と同程度まで上昇している。すす層の内縁半径および外縁半径が急減した時点ではパフイングが発生しており、すす層はその影響を受けているものと考えられる。含水率 $c_w=0.1$ の場合には、パフイングの頻度・強度が比較的小さいため、含水率 $c_w=0.2$ の場合ほど顕著には半径が減少しないものと推測される。

3.3 すす量指標 前述のように、すす層は、液滴を中心としたほぼ球対称の形状となっていると考えられる。そこで、球対称の仮定のもとに、散乱光強度の半径方向分布を全立体角で積分して得られた値を、液滴火炎内に存在する全すす量を定性的に示す指標(すす量指標)として用いた。算出されたすす量指標の経時変化を、図10～12に示す。図10～12には、液滴中心から輝炎の外縁までの距離(輝炎半径)の経時変化も示している。前述のように、輝炎半径はすす層の外縁半径にほぼ一致する。純粋燃料の場合(図10)、すす量指標は、液滴燃焼の進行とともに単調に増加し、燃焼中期に最大となった後は単調に減少している。この結果は、自由落下する液滴火炎中のすす量の経時変化を、サンプリング法を用いて調べた Randolph-Law の結果⁽²²⁾と定性的に一致している。また、輝炎半径が最大となるよりもわずかに早く、すす量指標は最大値を

示している。一方、乳化燃料の場合には(図11および図12)、燃焼初期のパフイング開始時には多少の変動が見られるものの、それ以外は純粋燃料の場合と同様に、単調に増加して最大となり、その後単調に減少している。ただし、乳化燃料の場合のすす量指標の値は、全燃焼期間をとおして、純粋燃料の場合よりも小さくなっており、含水率 $c_w=0.1$ と 0.2 では同程度である。

ここで、実験結果より式(2)を用いて得られる燃焼速度定数 K は、含水率 $c_w=0.1$ の場合は $0.65 \text{ mm}^2/\text{s}$ であり、純粋燃料の場合($0.72 \text{ mm}^2/\text{s}$)よりも小さな値となる。ただし、燃焼速度定数 K の測定誤差は最大で5%程度と見積もられる。燃焼速度定数が小さいということは、燃料の単位時間あたりの蒸発量が少ないことに相当する。したがって、含水率 $c_w=0.1$ の場合には純粋燃料の場合よりも蒸発量が減少し、それによって燃料より生成されるすすの量も減少すると考えられる。しかしながら、含水率 $c_w=0.2$ の場合の燃焼速度定数 K は $0.78 \text{ mm}^2/\text{s}$ であり、 $c_w=0.1$ の場合とは逆に、純粋燃料の場合より大きい。含水率 $c_w=0.2$ の場合は、比較的強いパフイングの影響により、燃焼が促進されるとともに、すすの酸化も促進されている可能性があると考えられる。したがって、乳化燃料液滴の火炎内のすす量の増減は、燃焼速度(蒸発速度)の大小だけでは説明できない。

すす量指標の最大値を比較すると、含水率 $c_w=0.1$ の乳化燃料の場合には、純粋燃料の場合よりも約40%減少している。しかしながら、含水率をさらに増やした $c_w=0.2$ のときのすす量指標の最大値は、含水率 $c_w=0.1$ の場合とほぼ同じである。したがって、液滴

Fig. 10 Temporal variation of instantaneous soot amount and luminous flame radius for pure *n*-dodecane droplet

Fig. 11 Temporal variation of instantaneous soot amount and luminous flame radius for emulsion droplet with water content of 0.1

Fig. 12 Temporal variation of instantaneous soot amount and luminous flame radius for emulsion droplet with water content of 0.2

火炎内のすす量は、含水率が増加しても単調には減少しないと推測される。一方、すす量指標が最大になるとほぼ同時期に現れる輝炎半径の最大値は、含水率 $c_w=0.1$ と 0.2 の場合でほぼ同じであり、その値は純粋燃料の場合よりも約 15% 小さい。ここで、輝炎半径が 15% 減少すると、輝炎が取り囲む体積は約 40% 減少する。また、図 6~8 に示されるように、散乱光強度分布は含水率により異なるが、すす量指標が最大となるときの分布曲線の形状は、同様であると考えられる。このことから、乳化燃料のすす量指標が純粋燃料のそれよりも小さくなるのは、火炎の縮小がおもな原因であると推測される。ただし、火炎の縮小は燃焼速度の変化(前述)では説明できない。機構解明には、間欠的に発生するパフリングの影響や、燃料とともに蒸発していると考えられる水が化学反応や移動現象に与える影響などを、詳細に調べる必要があると思われる。

4. 結 言

微小重力環境において、非接触計測法の一つである平面レーザ光散乱法により、 n -ドデカンベース燃料とする油中水滴型乳化燃料の液滴火炎内のすす濃度場の可視化を行った。得られたすすの散乱光像を画像処理し、すす濃度分布およびすす量を推定して、それらに及ぼす乳化燃料の含水率の影響を定性評価した。本研究により得られた結果は以下のとおりである。

(1) 液滴火炎内には、液滴を中心とした、厚みのある球殻状のすす層が形成される。燃焼中期以降は、このすす層の内縁付近においてすす濃度が極大となる。

(2) 乳化燃料液滴を燃焼させるとパフリングが間欠的に発生し、パフリング発生時には火炎やすす層が一時的にゆがめられるが、火炎形状やすす濃度分布の球対称性は、燃焼期間をとおしてほぼ保たれる。

(3) すす濃度分布に及ぼす乳化燃料の含水率の影響は小さい。

(4) すす層の存在する領域は、燃焼初期には液滴から遠ざかりながら急速に広がり、その後、燃焼中期から後期にかけては狭くなる。このように、液滴火炎中のすす層は非定常な挙動を示す。

(5) すす量は、液滴燃焼の進行とともに単調に増

加し、燃焼中期に最大値を示した後は単調に減少する。乳化燃料の場合のすす量は、全燃焼期間をとおして、純粋燃料の場合よりも少なくなり、最大値は純粋燃料の場合よりも約 40% 減少する。

(6) 乳化燃料の場合のすす量の減少は、主として火炎の縮小によるものである。

本研究は、「微小重力環境を利用した高度燃焼技術創出に関する研究開発」の一環として、(財)宇宙環境利用推進センターが新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託を受けて実施したものである。また、花王株式会社より乳化剤を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。最後に、本研究の遂行にあたり、濱屋秀行君(当時：大阪府立大学大学院生)および法師人克仁君(当時：大阪府立大学学生)の協力があつたことを記し、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 岡島敏・ほか 2 名, 機論, **50**-455, B(1984), 1769-1774.
- (2) 例えば, Dryer, F. L., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1977), 279-295.
- (3) Law, C. K., *Combust. Sci. Technol.*, **17**(1977), 29-38.
- (4) Lasheras, J. C., ほか 2 名, *Combust. Sci. Technol.*, **21**(1979), 1-14.
- (5) Law, C. K., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **37**(1980), 125-143.
- (6) Wang, C. H. and Law, C. K., *Combust. Flame*, **59**(1985), 53-62.
- (7) 本本恭司・ほか 2 名, 機論, **52**-477, B(1986), 2275-2282.
- (8) 吉本康文・ほか 2 名, 機論, **55**-519, B(1989), 3538-3543.
- (9) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **58**-546, B(1992), 582-586.
- (10) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **59**-560, B(1993), 1362-1367.
- (11) 津江光洋・ほか 2 名, 機論, **61**-583, B(1995), 1189-1194.
- (12) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **61**-583, B(1995), 1195-1200.
- (13) 津江光洋・ほか 2 名, 機論, **61**-587, B(1995), 2712-2717.
- (14) 津江光洋・ほか 3 名, 機論, **62**-601, B(1996), 3488-3493.
- (15) 山崎博司・ほか 3 名, 機論, **64**-618, B(1998), 562-567.
- (16) Shaw, B. D., ほか 3 名, *Acta Astronaut.*, **17**(1988), 1195-1202.
- (17) Jackson, G. S., ほか 2 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **33**-8(1992), 2017-2033.
- (18) Hara, H. and Kumagai, S., *Proc. 23rd Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1990), 1605-1610.
- (19) Jackson G. S. and Avedisian, C. T., *Proc. R. Soc., Ser. A*, **446**(1994), 255-276.
- (20) 角田敏一, 燃焼研究, **59**(1982), 15-33.
- (21) Kadota, T. and Hiroyasu, H., *Combust. Flame*, **55**(1984), 195-201.
- (22) Randolph, A. L. and Law, C. K., *Combust. Flame*, **64**(1986), 267-284.