軽油-水エマルジョンの噴霧火炎におけるマイクロ爆発の観測*

(第2報, 高速度撮影における時間的・空間的解像度の影響)

渕端 学^{*1}, 井田民男^{*1}, 水谷幸夫^{*2}Observation of Microexplosions in Spray Flames of
Light Oil-Water Emulsions(2nd Report, Influence of Temporal and Spatial Resolution in
High Speed Videography)Manabu FUCHIHATA^{*3}, Tamio IDA and Yukio MIZUTANI^{*3} School of Science and Engineering, Kinki University,
3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka-shi, Osaka, 577-8502 Japan

Microexplosions of light oil-water emulsified fuel droplets were successfully documented using a high speed video camera with laser illumination. The temperature profile and the local frequency of explosion occurrence were estimated in open spray flames of water-in-oil type emulsion formed using an air-assist atomizer with a set of ring pilot burners. The estimates of the local frequency of the explosion occurrence were made in the upstream region of spray flames, since their temperature profiles indicated that the heat release was accelerated in the upstream region from the nozzle tip up to the height of 80 mm. Microexplosions were frequently observed in the upstream region where no microexplosion phenomenon was observed in the former study. In addition, all of those had very small spatial and temporal scales. It is probable that the principal factor having effects on the heat release of emulsion spray flame is not the microexplosions of larger droplets, as former theories predicted, but those of smaller ones. We, furthermore, observed the microexplosions of smaller droplets using an ultra high speed video camera, the frame rate of which was 10^6 frames/s. It was observed that the smaller droplets, whose diameter were less than $50\text{ }\mu\text{m}$, exploded in the spray flame and their temporal and spatial scales were around $10\text{ }\mu\text{s}$ and $300\text{ }\mu\text{m}$, respectively.

Key Words: Spray Flame, Emulsified Fuel, Microexplosion, Flame Structure, High Speed Video Camera

1. 緒 言

燃料の水乳化燃焼法は燃焼性の改善と NO_x 排出量の低減を同時に達成できる燃焼技術とされており, これは, その特徴的現象である油滴のマイクロ爆発による二次微粒化, 水添加による燃焼温度の低下や水蒸気と燃焼ガスとの水性ガス反応によるものと考えられている。

マイクロ爆発現象については従来より, 多くの研究が行われ⁽¹⁻⁵⁾, 加熱・燃焼によりマイクロ爆発に至る過程における油滴内部の排液・凝集現象の観察や, 燃料と乳化剤の種類および含水率の違いによる現象の差異について報告されており, 理論解析との比較も行われている。しかしこれらの研究の多くは数 mm から数百 μm オーダーの巨大滴を対象としており, 数十 μm から数 μm の油滴が大半を占める噴霧火炎中においてマイクロ爆

発現象を観察した報告は少ない⁽⁶⁻⁹⁾。特にマイクロ爆発現象を直接撮影したものは Sheng ら⁽⁹⁾がルビーレーザ・ホロカメラにより油滴群のマイクロ爆発を撮影した報告が見られるくらいである。しかも撮像系の時間的・空間的解像度が不足しており, 個々の油滴の爆発挙動を確認するには至っていない。

前報⁽¹⁰⁾では, 二流体噴射弁を用いた開放噴霧火炎を対象として, シュリーレン光学系と類似の撮像系を用い, 前方散乱光像をイメージ・インテンシファイア付き高速度ビデオカメラにより撮影した。その結果, 噴霧ノズルの上方, 距離 $z = 90\text{ mm}$ より下流の位置において, 油滴マイクロ爆発現象の直接連続像撮影に成功し, 単滴燃焼の場合と同様の爆発パターンが噴霧火炎においても見られることを示した。しかし噴霧中心軸上の温度分布の計測結果からは, ミクロ爆発による二次微粒化の影響と見られる温度上昇が, おもに $z = 90\text{ mm}$ より上流で見られたのに対して, その範囲ではマイクロ爆発はほとんど確認されなかった。この不整合の原因として, レーザの出力および撮影速度の不足により, 小

* 原稿受付 2002年9月26日。

^{*1} 正員, 近畿大学理工学部(☎ 577-8502 東大阪市小若江3-4-1)。^{*2} 正員, 名誉員, 近畿大学理工学部。
E-mail: fuchihata@mech.kindai.ac.jp

規模かつ高速のマイクロ爆発現象が観察できなかったことが考えられた。そこで本報ではレーザービームの強度を高め、撮影速度を上げることににより、より詳細にエマルジョン噴霧燃焼時の油滴挙動を観察することを試みた。

2. 実験装置と実験方法

図1に供試バーナを示す。噴霧ノズルには外部混合式二流体噴射弁(いけうち製, SETO Jet 0405)を用いた。燃料噴口径は0.5 mmで、その周囲の内/外径2.4 mm/2.8 mmのリング状スリットから霧化用空気が噴出する。さらにその周囲に直径1 mmの噴孔を直径28 mmのピッチ円上に16個設けた都市ガス拡散パイロットバーナを設置して、火炎を安定化させた。霧化用空気の流量は6.52 l/min, 燃料の流量は0.1 m³/s, パイロットバーナの都市ガス流量は2.09 l/minとした。座標系は二流体噴射弁の燃料噴口中心を原点に、上方に z 軸, 半径方向に r 軸をとった。

水乳化燃料は油中水滴型で、軽油70%, 水28%, 乳化剤2% (体積比)の組成とした。乳化剤には非イオン性のソルビタンモノオレエート(花王, エマゾールO-10(F))とポリエチレングリコールモノオレエート(花王, エマノーン4110)をそれぞれ1.54%, 0.46%ずつ混合し、

Fig. 1 Burner

HLB 値を6.0に調整して添加した。攪拌には機械式攪拌器⁽¹⁰⁾を用い、温度を30℃に保ちながら1時間攪拌して水乳化燃料を作成した。この水乳化燃料はサンプルを光学顕微鏡とCCDビデオカメラで数時間ビデオ撮影し、その時間内では油中水滴径が変化しないことを確認した。一回の実験は水乳化燃料作成から約1時間以内に終わっているため、燃料の安定性は十分である。

上記の燃料および噴射条件により形成された水乳化燃料の非燃焼噴霧の粒度分布を、LDSA (東日コンピュータアプリケーションズ, LDSA-1300A, レーザビーム径: 約10 mm, 分布関数: Rosin-Rammler 関数) により測定した。測定は高さ方向に $z = 10$ mm~90 mm

Fig. 2 SMD distribution of the spray.

Fig. 3 Droplet size distribution at $z = 20$ mm, $r = 0$ mm.

を 10 mm 間隔, $z = 90 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ を 30 mm 間隔で行い, 半径方向に $r = 0 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$ を 10 mm 間隔で行った. 図 2 にその Sauter 平均粒径の空間分布を示す. 半径位置 $r = 10 \sim 25 \text{ mm}$ より外側で SMD が急激に大きくなっているが, 目視ではこの領域に噴霧流はほとんど確認できない. よってこれらは, いったん下流まで流れた粗大滴が主流から外れ, 噴霧周囲に落下してきたところを測定器に捕らえられたものと考えられる. 図 3 にパイロットフレームと噴霧流との合流点付近である, $z = 20 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$ での油滴個数粒度分布の PDF を示す. $10 \mu\text{m}$ 以下の微小滴から $200 \mu\text{m}$ 程度の粗大滴まで幅広い粒度分布となっていることが分かる. LDSA による測定結果はレーザビームの測定範囲光路上すべての積算値となるため, 実際には中心付近の SMD は測定値より幾分小さく, 粒度分布も粗大滴の割合が幾分少ないと考えられる.

図 4 に計測装置の概略を示す. ミクロ爆発の観察は, レーザ光束を噴霧火炎に照射し, その擬似前方散乱光を II (イメージ・インテンシファイア) 付き高速ビデオカメラで撮影することにより行った. 光源には Ar^+ レーザ (Spectra-Physics, Stablite 2017, 波長 488 nm, 出力 1.4 W) を使用した. レーザ光は顕微鏡接眼レンズ (x15) で拡大された後, 平凸レンズ (焦点距離 400 mm) によって収束光とされる. 撮像位置での光束の直径は約 20 mm である. 高速ビデオカメラ (PHOTRON, FASTCAM I, 撮影速度 40,500 fps) は, レーザ光軸から 11° の角度をもって前方に配置され, レーザビーム束中心付近の $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ の範囲を 64 pixels $\times$ 64 pixels の解像度で撮

Fig. 4 Measuring system

影した. ミクロ爆発現象は, 上流側から下流側へ飛行する油滴のミー散乱光像が急激に大きく, 明るくなった後, 消滅するという現象として観測される. 高速ビデオカメラは感度が弱く, 火炎は画像にほとんど写らないことをレーザ非入射時の画像で確認してある. よってこれはミクロ爆発の瞬間に油滴が分裂してその近傍に分散すること, および爆発の瞬間に油滴が非球形化することにより S/V (表面積/体積) 比が増大するためと考えられる.

3. 結果および考察

図 5 に噴霧ノズル上方, 距離 $z = 50 \text{ mm}$ および 95 mm で観察されたミクロ爆発の例を示す. 今回の実験では, 前報⁽¹⁰⁾でミクロ爆発が確認できなかった $z = 90 \text{ mm}$ 以下の上流部においても図 5 (a) に示すようなミクロ爆発現象が観察された. このミクロ爆発は, 爆発から消滅までが $1/10000 \text{ s}$ 程度で完了する非常に瞬間的な現象であり, 爆発の時間および空間スケールも前報で観察されたものより小規模である. しかし同じ位置で観察

 (a) $z = 50 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$

 (b) $z = 95 \text{ mm}$, $r = 10 \text{ mm}$

Fig. 5 Sequential images of the microexplosions.

されたマイクロ爆発の多くはこれよりもさらに高速かつ小規模の現象であり、40,500 fpsの撮影速度をもってしても1~2コマしか爆発が継続しないものであった。これらの結果から、前報の撮影条件(13,500 fps)では時間解像度およびレーザビーム強度が不足していたため、上流部でのマイクロ爆発現象が観察できていなかったものと考えられる。

これらの高速かつ小規模なマイクロ爆発現象は上流部に特有のものではなく、 $z = 90$ mm以上の下流部においても、図5(b)に示すような瞬間的なマイクロ爆発現象が新たに観察された。

このように前報⁽¹⁰⁾の実験装置に比べて、より多くのマイクロ爆発が確認できるようになったため、マイクロ爆発発生頻度のカウントをやり直した。図6に(a) 純軽油、(b) 水乳化燃料における火炎の直接撮影像 (r 軸の負側)と直径0.2 mmのRタイプ裸熱電対により測定された平均温度分布 (r 軸の+側)を示す。温度の測定は高さ方向、位置 $z = 5$ mmおよび $z = 10$ mmから下流を10 mm間隔で行い、半径方向に $r = 0$ mmから5 mm間隔で行った。さらに(c)にはマイクロ爆発発生頻度の空間分布を示した。マイクロ爆発発生頻度は、実時間約0.4秒間(16,384 コマ)の高速度ビデオ画像から目視によりカウントされたマイクロ爆発回数より算出した。カウントは高さ方向に $z = 10$ mmから下流を10 mm間隔で行い、半径方向に $r = 0$ mmから10 mm間隔で行った。平均温度およびマイクロ爆発発生頻度は、火炎の存在が直接撮影像で確認できる範囲で示してある。

図7に示したバーナー中心軸上の温度分布からも分かるように、水乳化燃料の場合、火炎上流部での温度が、同じ高さにおける純軽油火炎の温度より高くなっていること、および火炎の輝度が全体に低くなっていることは前報⁽¹⁰⁾と同様である。しかし図6(a), (b)の右半分に示した温度分布を詳しく見ると、純軽油の場合も水乳化燃料の場合もともに、 $z = 60 \sim 90$ mmにおける中心軸付近の温度、ならびに温度が 100°C 程度に低下する最大半径は約20 mmで、同程度であるが、 $z = 40 \sim 120$ mmの範囲における高温領域の半径方向への広がり方には明確な差異が見られる。すなわち、純軽油では下流に行くにしたがって滑らか、かつ緩やかに高温領域が半径方向に広がるのに対して、水乳化燃料の方は $z = 60$ mm付近で唐突、かつ急激に広がっている。

このような差異が生じる原因は、水乳化燃料の火炎において、最初中心軸近傍に限られていた油滴マイクロ爆発の発生が、ある高さから急に広い範囲で起こり始めたこと以外には考えられないが、油滴マイクロ爆発の頻度分布を表示した図6(c)を見ると、そのことが確認

できる。すなわち、高さ $z = 40$ mm付近から $r = 10$ mm付近を中心にマイクロ爆発の発生頻度が上昇し始めるとそこからマイクロ爆発の観察される領域が半径方向に広

Fig. 6 Direct photographs, temperature profiles and frequency of microexplosions.

Fig. 7 Temperature profiles on the burner axis.

がっけいき、 $z = 110$ mm 付近では、発生頻度の高い領域が中心軸上から $r = 20$ mm 付近にまで広がっている。

$z = 130$ mm 付近にマイクロ爆発の発生頻度が極大値をとるスポットが見られるが、図6(b)および図7を見ると火炎中心付近の温度は、その前後 $z = 120$ mm から 150 mm までの間に約 300°C 急低下しており、火炎の先端はその少し上部 $z = 170$ mm 付近に存在する。すなわち、 $z = 40$ mm 付近から発生頻度が増加し始めた油滴マイクロ爆発の二次微粒化効果によって、半径方向への火炎の広がり、下流へ向けての燃焼過程が加速され、 $z = 130$ mm 付近で生じるマイクロ爆発の集中的な発生後に燃焼過程が終了するという構図が観察される。 $z = 40$ mm 付近から発生頻度が増加し始める油滴マイクロ爆発による二次微粒化効果と、それにより発生する水蒸気の水蒸気反応によってすすの発生が抑制され、 $z = 40$ mm 近傍では乳化燃料の方が火炎温度が高いにもかかわらず、火炎の輝度は低い状態が保たれている。

画像観察の結果、上記のエマルジョン火炎の二つの特徴、火炎基部の速い温度上昇および火炎下流部での火炎長短縮、の現れるそれぞれの位置において観察されるマイクロ爆発の規模に違いがあることが分かった。そこで、油滴マイクロ爆発の規模が火炎内の位置によって変化する様子を調べてみる。規模の指標としては、連続した各マイクロ爆発画像の内の最大直径を採用することとした。この方法により観察されたマイクロ爆発の

Fig. 8 Frequency of microexplosions conditionally sampled with their spatial scale.

空間スケールは約 0.2 mm ~ 2 mm の範囲であった。前報で観察されたマイクロ爆発がほぼすべて 1 mm 以上であったため、これをしきい値として直径が 1 mm 以下の小規模マイクロ爆発の発生頻度分布を図8(a)に、 1 mm 以上の大規模マイクロ爆発の発生頻度分布を図8(b)に示す。どちらも発生頻度のピークが $z = 130$ mm, $r = 10$ mm 付近にくる点では変りがないが、小規模なマイクロ爆発の発生頻度が大規模なものの約3倍で、 $z = 40$ mm 付近からかなりの頻度で観察されるのに対して、大規模なものの頻度は $z = 110$ mm 付近から急増している。このことから、小規模なマイクロ爆発が、上流部から徐々に燃焼過程を加速し、同時に水性ガス反応によってすすの発生を抑制して、火炎輝度を抑える役目を果たすのに対して、大規模なマイクロ爆発は火炎先端近くで頻度が急増して、火炎長さを短縮する役目を果たすと考えられる。

最高撮影速度 $40,500$ fps の高速度カメラによる撮影では、小規模なマイクロ爆発の多くは1コマでしか捕らえられなかったため、その発生から消滅までの時間スケールを確かめることはできなかった。しかし筆者らは、近大・江藤教授、島津製作所、ドイツ・オズナブルック工科大学らのグループにより開発された、最高撮影速度 1 Mfps の超高速カメラの試作機を使用して、小規模なマイクロ爆発の撮影を行い、その時間スケール

Fig. 9 Sequential images of microexplosion captured with ultra high speed camera.

を確かめることを試みた。

図9に撮影速度 500,000 fps で撮影されたマイクロ爆発の一例を示す。画像は $z=90$ mm, $r=0$ mm の位置を中心に 9.6 mm $\times$ 8.0 mm の範囲を 312 pixels $\times$ 260 pixels の解像度で撮影した像から 78 pixels $\times$ 65 pixels の範囲を取り出したものである。カメラ本体以外の装置類は図4に示したものと同一である。このマイクロ爆発の空間スケールは約 300 μ m で、これまでの観察で小規模なマイクロ爆発に分類してきたものである。爆発発生から消滅までの時間はコマ数にして5コマ程で、持続時間は約 10 μ s である。

画像では爆発前の飛行する油滴も確認でき、その大きさは画像上で 1 pixel で、粒径はカメラの CCD 素子の構造から推測して 20 μ m $\sim$ 50 μ m と考えられる。さらに画像上の移動距離から計算すると、爆発直前の油滴移動速度は約 23 m/s であり、噴射から遅くとも約 4 ms でマイクロ爆発に至っていると考えられる。

この観察結果では、飛行する微小油滴の像が一瞬に油滴径の 6 $\sim$ 15 倍ほどの範囲に広がり、消滅するという現象が確認でき、微小油滴でもかなり激しくマイクロ爆発を起こしているものと考えられる。さらに、大規模なマイクロ爆発では非等方性の爆発も画像上で確認できたが、小規模なマイクロ爆発では爆発に目立った非等方性は確認できなかった。これらの結果から、微小油滴のマイクロ爆発では、パフィンング等の非等方性爆発現象は起こりにくいものと考えられる。

また、微小油滴が非常に短時間でマイクロ爆発に至っていることから、水相の凝集・合一過程は微小油滴においてマイクロ爆発発生の必要条件ではないと考えられる。

粗大油滴では加熱の際に液滴外縁部と液滴中心部とで温度差が生じるため、相分離が遅いと液滴外縁部の油中水滴のみが突沸することになり、油滴を変形させる、もしくは弱いパフィンングにとどまってマイクロ爆発に至らない。しかし微小油滴では油滴中心部まで短時間で加熱されるため、油滴中に分散したままでも油中水滴全体が過熱状態となり、その内一つの突沸の衝撃ですべての油中水滴が瞬時的、連鎖的に突沸し、油滴マイクロ爆発を起こさせるのではないかと考えられる。

噴霧火炎は微視的には拡散燃焼的な機構により燃焼していると考えられる。その中で油滴がマイクロ爆発を起こすと、二次微粒化された液滴が母油滴近傍に分散することにより蒸発速度が速くなり、燃料蒸気と周囲空気との混合が促進される。この結果、水の蒸発潜熱により燃焼場の温度が低下する影響でいくらか相殺されるものの、適度な水添加率の水乳化燃料では燃焼速度が向上し、火炎長の短縮等の効果が表れると考えられる。

4. 結 言

軽油-水エマルジョン噴霧の開放火炎において、油滴ミ-散乱光像の高速拡大撮影により、油滴マイクロ爆発現象の直接観察を行った。前報⁽¹⁰⁾の実験から、さらにレーザビームの強度を高めることにより高速撮影の速度限界を広げて観察を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1) 前報においては油滴マイクロ爆発が確認できなかった噴射ノズルからの距離 $z \leq 90$ mm の、火炎上流部においてもマイクロ爆発の発生していることが確認された。
- (2) $z=40$ mm 付近から発生頻度が増加し始めた小規模マイクロ爆発の二次微粒化効果によって、半径方向への火炎の広がり、下流へ向けての燃焼過程が加速され、 $z=130$ mm 付近で生じるマイクロ爆発、特に大規模マイクロ爆発の集中的な発生が、火炎の長さを短縮させるという構図が観察された。
- (3) $z=40$ mm 付近から発生頻度が増加し始める小規模マイクロ爆発による二次微粒化効果と、発生水蒸気による水性ガス反応によってすす生成が抑制され、火炎温度が高いにもかかわらず、火炎の輝度は低い状態が保たれるようである。
- (4) 爆発の開始から消滅までの時間が 100 μ s 以下という、極度に高速の油滴マイクロ爆発も生じており、最も小さなものでは、直径数十 μ m の微小油滴が時間スケール 10 μ s 程度の高速でマイクロ爆発を起こしていることが確認された。

文 献

- (1) 岡島・ほか2名, 機論 **50**-455B, (1984), p.1769.
- (2) 木本・ほか2名, 機論 **61**-582B, (1995), p.738.
- (3) Tsue, M.・ほか2名, Proc. Combust. Inst., Vol. 26, (1996), p.1629.
- (4) 山崎・ほか3名, 第37回燃焼シンポジウム講論集, (1999), p.319.
- (5) 木本・ほか2名, 第37回燃焼シンポジウム講論集, (1999), p.321.
- (6) 水谷・多木, 機論 **47**-424B, (1981-12), p.2386.
- (7) Mattiello, M.・ほか4名, Proc. Combust. Inst., Vol. 24, (1992), p.1573.
- (8) Xu, H.・ほか3名, Atom. Sprays, **3**-2 (1993-4/6), p.193.
- (9) Sheng, H.Z.・ほか5名, Proc. Combust. Inst., Vol. 25, (1994), p.175.
- (10) 水谷・ほか3名, 機論 **66**-646B, (2000-6), p.1544.