高温壁面上での乳化燃料液滴蒸発・燃焼時における
マイクロ爆発発生統計的検討*田中 創^{*1}, 寺地 誠喜^{*2}, 山崎 博司^{*3}
瀬川 大資^{*4}, 角田 敏一^{*4}Statistical Analysis of Micro-Explosion of an Emulsion Droplet
Evaporating and Burning on a Hot SurfaceHajime TANAKA, Seiki TERAJI, Hiroshi YAMASAKI^{*5},
Daisuke SEGAWA and Toshikazu KADOTA^{*5} College of Industrial Technology, Nihon University,
1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba, 275-8575 Japan

An experimental study has been carried out to reveal the statistical characteristics of the onset of micro-explosion of an emulsion droplet evaporating and burning on a hot surface. The oil-in-water emulsion consisting of base fuel and water doped with small amount of surfactant is tested after degasification. Detail measurements of the waiting time for the onset of micro-explosion are made for various water contents and surface temperatures. Photographic observation and temperature measurements are made to understand the transport processes of liquid phases inside the droplet and the rate of micro-explosion. The results show that the agglomeration and separation of the water and the base fuel layers occurs prior to the micro-explosion. It is also confirmed that the distribution function of the waiting time is correlated with the Weibull distribution of the wear-out type. An empirical formula is proposed for the rate of micro-explosion as a function of droplet temperature and volume of water layer.

Key Words: Combustion, Evaporation, Liquid Fuel, Emulsion Droplet, Micro-Explosion, Hot Surface, Weibull Distribution

1. 緒 論

石油系燃料(ベース燃料)と水に少量の界面活性剤を加え安定化させた乳化燃料の燃焼過程では、多くの場合、水の急激な相変化に伴うマイクロ爆発およびそれに続く二次微粒化が発生する。二次微粒化が生じると、燃料と空気との混合が促進されるため、燃焼効率が向上し、すすおよび未燃炭化水素の発生が抑制される。また、水蒸気の発生により燃焼温度が低下するため、窒素酸化物の発生が抑制される。このような利点のため、乳化燃料の燃焼に関する研究は従来より数多く行われてきた^{(1)~(3)}。実際の燃焼器における燃焼および排気特性を包括的に調べたものとして、Petersら⁽⁴⁾によるガソリン機関、Greevesら⁽⁵⁾によるディーゼル機関、Sjogrenら⁽⁶⁾による工業炉、Hallら⁽⁷⁾によるボイラ、Spadacciniらによるガスタービン⁽⁸⁾に関する研究が挙げられる。乳化燃料の噴霧燃焼に関しては、

Gollahalliら⁽⁹⁾、Kadotaら⁽¹⁰⁾、水谷ら⁽¹¹⁾、廣安ら⁽¹²⁾によって実験的検討が行われている。また、乳化燃料の燃焼現象をより深く理解する目的で、乳化燃料単一液滴の燃焼過程に関する研究が行われており、代表的なものとして、Lasherasら⁽¹³⁾、Yapら⁽¹⁴⁾、Wangら⁽¹⁵⁾の研究が挙げられる。さらに、木本ら⁽¹⁶⁾、吉本ら⁽¹⁷⁾、Avedisianら⁽¹⁸⁾、Chungら⁽¹⁹⁾によって高温壁面上での乳化燃料液滴の蒸発・燃焼に関する実験的検討が行われている。しかしながら、これらの研究では現象論的な記述が主であり、乳化燃料液滴内での移動現象を含む基礎的な検討がなされていない。とくに乳化燃料液滴におけるマイクロ爆発発生は、ベース燃料と添加水分が関与する液相輸送過程、および微視的な気泡核生成とその成長過程に支配されるなど極めて複雑であり、いまだ不明な点が多く残されている。

著者らの一部はマイクロ爆発発生現象を解明するための基礎的研究を系統的に行ってきた。まず、ガラス細管内に保持・加熱された乳化燃料のマイクロ爆発発生について実験を行い、ワイブル分布を用いた統計的手法によって、マイクロ爆発発生率に及ぼす温度、体積、含水率およびベース燃料性状の影響^{(20)~(22)}を明らかにした。ついで乳化燃料液滴燃焼時について同様な手法を用いて、マイクロ爆発発生率に及ぼすベース燃料、含

* 原稿受付 2003年6月25日。

^{*1} 准員、大阪府立大学大学院工学研究科(☎599-8531 堺市学園町1-1)。^{*2} 大阪府立大学大学院工学研究科[現:日東電工(株)]。^{*3} 正員、日本大学生産工学部(☎275-8575 習志野市泉町1-2-1)。^{*4} 正員、大阪府立大学大学院工学研究科。

E-mail: hyama@cit.nihon-u.ac.jp

水率、重力条件などの影響^{(23)~(27)}を解明するとともに、乳化燃料液滴内部において、マイクロ爆発発生までにベース燃料と添加水分との相分離が発生していることを示した^{(28)~(30)}。

本研究では、上記一連の研究の一環として、高温壁面上で蒸発・燃焼する乳化燃料液滴のマイクロ爆発発生現象の統計的性質およびそれと関連する因子の影響について検討を行った。実用燃焼器では燃焼室壁面上で燃料の一部が蒸発、燃焼することから、当該現象の解明は学術的ならびに実用的見地から重要である。ここでは第1段階として、初期直径2 mmの*n*-ドデカン-水系水中油滴形乳化燃料液滴の高温壁面上における、蒸発時および燃焼時のマイクロ爆発発生現象を統計的見地から調べることが目的とした。乳化燃料液滴を平滑なステンレス壁面上に滴下し、蒸発および燃焼させた場合の光学的観察を行うとともにマイクロ爆発発生待ち時間を測定した。待ち時間分布に及ぼす含水率および壁面温度の影響を調べるとともに、マイクロ爆発発生率と液滴温度との関係を明らかにしたので、その結果について報告する。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は高温壁面ブロック、電熱器、壁面温度測定用熱電対、液滴温度測定用熱電対、乳化燃料液滴(以下、燃料液滴)、ビデオカメラ、温度データ記録系から構成される。高温壁面ブロックは直径60 mm、高さ40 mmのSUS304製円柱の上端面を、曲率半径100 mm、中心深さ約5 mmのなめらかな凹面に加工したものである。壁面ブロックの加熱には下方に設置した電熱器を用い、電熱器の入力電圧を調整することにより温度制御を行った。ブロック表面下5、10 mmおよび15 mmの位置に中心軸に沿って、3本のK熱電対(素線径0.1 mm)

Fig.1 Experimental apparatus

の測温接点を設置されており、これら3点の温度を外挿することにより壁面温度を決定した。

ベース燃料は*n*-ドデカン(試薬一級)であり、界面活性剤にはポリオキシエチレン(9)ノニルフェニルエーテル[エマルゲン909, HLB値=12.4, 花王(株)]を使用した。ベース燃料、蒸留水および界面活性剤を混合し、マグネチックスターラでかくはんして乳化燃料(以下、燃料)を作成した。これにより、水中油滴形の燃料が調製される。初期状態の水の体積割合を初期含水率(以下、含水率)と呼び、0.1および0.2とした。また、燃料に対する界面活性剤の混合割合は0.01(体積比率)とした。燃料液滴燃焼時のマイクロ爆発発生現象は、燃料中に溶存する気体の影響を受けることが知られている⁽²⁰⁾。本研究においても、既報⁽²⁰⁾と同様に実験前に燃料を約5 kPaで1 h以上保持し、脱気処理を行った。

壁面温度が一定になった状態でマイクロシリンジにより壁面上方約10 mmの位置から燃料液滴を滴下させた。燃焼実験では、壁面接触時に小さなメタン炎によって燃料液滴の着火を行った。壁面接触後からマイクロ爆発が生じるまでの燃料液滴の蒸発および燃焼挙動をビデオカメラ(撮影速度30 frames/s)で撮影し、撮映像から液相変化、燃料液滴直径ならびにマイクロ爆発発生待ち時間を計測した。

燃料液滴温度は、壁面上方に設置された素線径50 μm のK熱電対(蒸発時)またはR熱電対(燃焼時)を用いて測定した。実験期間中、モニタ拡大像から測温接点が燃料液滴内に埋没していることを確認した。燃料液滴の初期直径は2 mm一定とし、壁面温度650、700 Kにおいて実験を行った。

3. 実験結果および考察

図2は、700 Kの高温壁面上で蒸発する燃料液滴(含水率0.2)の異なる時間における映像である。図2(a)は壁面接触後0.067 sにおける映像であり、燃料液滴は均一な乳白色である。図2(b)は接触後0.97 sの映像である。燃料液滴内部に球状の白濁域が存在し、その周辺を透明な相が覆う構造となっている。同様の現象は、微小重力環境において燃焼する懸垂燃料液滴の内部でも観察され、液滴温度上昇とともに、添加水分が中心部に球状に凝集し、その周囲をベース燃料が覆うことが報告されている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。この相分離現象は、通常重力下での懸垂液滴燃焼時ならびに自由液滴の燃焼時にも観察⁽²⁷⁾⁽³⁰⁾されており、既報での検討から内部白濁層は燃料中の水分が凝集したものと考えられる。図2(c)はマイクロ爆発発生直後における映像

Fig. 2 Typical behavior of emulsion droplet

Fig. 3 Time histories of squared diameter of emulsion droplet and water droplet

Fig. 4 Distribution function of waiting time for the onset of micro-explosion

である。燃料液滴は、マイクロ爆発により二次的に微粒化され、小さく分散して飛散する。本報告では、この二次微粒化を伴う急激な相変化をマイクロ爆発と呼び、その統計的な性質を明らかにした。

図3は、含水率0.1、壁面温度700 Kにおける、蒸発時および燃焼時の燃料液滴直径の二乗値の経時変化である。横軸は燃料液滴が壁面に接触した時刻を起点とした経過時間 t であり、縦軸は任意時刻での燃料液滴直径 D_e および相分離後の水分直径 D_w を、燃料液滴の初期直径 D_0 で規格化した無次元直径の二乗値である。燃料液滴の直径二乗値は、滴下直後、一定もしくは微増し、その後ほぼ直線的に減少する。図3中の×記号はマイクロ爆発発生を示している。燃焼時の直径二乗値の減少割合は蒸発時に比べ大きく、火炎によって加熱され蒸発が促進されているためと考えられる。一方、蒸発時および燃焼時いずれの場合も水分直径の時間変化は小さく、それらの値は初期含水率から算出された直径比にほぼ等しい。これらの結果は、液滴燃焼時の直接採取法によって得られた結果と定性的に一致している⁽²⁷⁾。以上の結果から、高温壁面上にお

いても、水分が燃料液滴内部に凝集した後はベース燃料のみが蒸発しているものと考えられる。

図4に蒸発時および燃焼時における燃料液滴のマイクロ爆発発生待ち時間分布を示す。横軸は燃料液滴が壁面に接触した時刻からマイクロ爆発発生までの待ち時間 τ_{wa} であり、縦軸は分布関数 F である。図4中T.C.は燃料液滴内に熱電対測温接点を挿入した場合の待ち時間である。燃焼時のマイクロ爆発発生待ち時間分布は蒸発時に比して短い時間から立ち上がり、曲線が左側に移行する。これは、蒸発時よりも燃焼時に、マイクロ爆発発生待ち時間が短いことを示しており、火炎の存在により液滴温度の上昇が促進された結果と考えられる。一方、全体的な分布形状は、燃焼時、蒸発時ともにほぼ同様であり、待ち時間の短い領域で緩やかに増加した後、急激な上昇期間を経て再び緩やかに増加している。このことから、火炎が分布形状には大きく影響していないと考えられる。図4中には、燃料液滴温度測定時のマイクロ爆発発生待ち時間分布が併せて示されている。燃料液滴内に熱電対測温接点が挿入された場合、マイクロ爆発発生の起因となる微視的な初気泡核

Fig. 5 Weibull plot of waiting time for the onset of micro-explosion

Fig. 6 Time histories of rate of micro-explosion

発生などに影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、本実験の範囲では、熱電対測温接点の有無はマイクロ爆発発生待ち時間分布に大きく影響していないことがわかる。本結果と既報の結果を考え合せると、燃料液滴内での熱電対接点や懸垂線の存在は相分離およびマイクロ爆発発生待ち時間分布に対して本質的な影響を及ぼすものでないと予測される。

燃料液滴や2成分混合燃料液滴のマイクロ爆発発生待ち時間が、ワイブル分布によって整理できることが知られている⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽³¹⁾。本研究も同様の手法を適用し、マイクロ爆発発生現象の統計的性質について検討を行った。マイクロ爆発発生待ち時間の分布関数 $F(\tau)$ および発生率 $J(\tau)$ は次式で示される。

$$F(\tau) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^m \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$J(\tau) = \frac{m\tau^{m-1}}{\alpha^m} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで m , α は形状母数, 尺度母数である。

図5は、図4の結果をワイブル確率紙上にプロット

Fig. 7 Distribution function of waiting time for the onset of micro-explosion (effect of hot surface temperature)

したものである。横軸は、図4における分布関数と時間軸の交点を起点とした待ち時間 τ_{wi} である。マイクロ爆発発生待ち時間分布が確率紙上で直線で整理できることから、ワイブル分布で近似できると考えることができる。図5中に示されたとおり、近似された直線の傾き(形状母数) $m=2$ であることから、壁面上で蒸発、燃焼する燃料液滴のマイクロ爆発発生待ち時間は磨耗故障形ワイブル分布に分類される。

図6にマイクロ爆発発生率の経時変化を示す。横軸は τ_{wa} 、縦軸はマイクロ爆発発生率 J である。また、実線は、図5の直線の m , α と式(2)より求めたマイクロ爆発発生率である。マイクロ爆発発生率は時間経過とともに増大しており、その要因の一つとして燃料液滴温度の上昇が考えられる。図6中には相分離およびマイクロ爆発発生期間が併せて示されている。相分離は燃焼時で0.4 s、蒸発時で0.47 sに始まり、それぞれ0.57, 0.67 sに終了しており、マイクロ爆発発生率が十分に小さい領域で相分離が完了することがわかる。

図7は、含水率0.1、壁面温度650 Kおよび700 Kにおけるマイクロ爆発発生待ち時間分布を示したものである。壁面温度を650 Kから700 Kに変化させた場合、分布は左側に移行している。図8は、図7の結果のワイブルプロットである。図8からマイクロ爆発発生待ち時間分布は平行な2本の直線で近似できることがわかる。これらの直線の傾きすなわち形状母数はいずれも2であり、磨耗故障形に分類される。また尺度母数は、壁面温度が高くなるにつれて小さくなる。これらの結果から、壁面温度は液滴温度上昇過程に影響を及ぼしており、一方マイクロ爆発は壁面温度にかかわらず液滴温度の上昇過程において発生していることがわ

Fig. 8 Weibull plot of waiting time for the onset of micro-explosion (effect of hot surface temperature)

Fig. 9 Distribution function of waiting time for the onset of micro-explosion (effect of water content)

かる。

図9にマイクロ爆発発生待ち時間分布に対する含水率の影響を示す。壁面温度は700 K、含水率は0.1, 0.2における結果である。含水率の上昇とともに、マイクロ爆発発生開始までの待ち時間は短くなり、分布関数は左側へ移行する。

図10は、図9の結果のワイブルプロットであり、待ち時間分布は平行な2本の直線で整理できる。また形状母数はそれぞれ2となり、摩耗故障形に分類される。尺度母数は含水率が0.1, 0.2の場合にそれぞれ0.39, 0.32であり、含水率が高い場合に尺度母数は減少する。

図11に、マイクロ爆発発生率と燃料液滴温度との関係を示す。微小重力環境下および通常重力環境下での燃料液滴燃焼時のマイクロ爆発発生率は、燃料液滴温度 T_E の逆数で整理されるとともに、燃料液滴中の水分

Fig. 10 Weibull plot of waiting time for the onset of micro-explosion (effect of water content)

Fig. 11 Relationship between the rate of micro-explosion and the emulsion droplet temperature

量 V_w に比例することが知られている⁽³⁾。ここでは、高温壁面上で蒸発および燃焼する燃料液滴のマイクロ爆発発生率に対して同様の整理を試みた。横軸、縦軸はそれぞれ $1/T_E$ 、液滴内水分量で規格化されたマイクロ爆発発生率 J/V_w とした。図3の結果から V_w は初期水分量とした。図11中の点は、式(2)から算出されたマイクロ爆発発生率とその時刻において測定された液滴温度に基づいている。図11中のEv, Coはそれぞれ蒸発時、燃焼時を表している。マイクロ爆発発生率は、蒸発、燃焼、壁面温度にかかわらず、次式により整理されることがわかる。

$$J = K V_w \exp \left[-\frac{A}{T_E} \right] \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 K, A は実験定数である。本実験式は、液滴燃焼時におけるマイクロ爆発発生率の予測式と類似である。すなわち高温壁面上で蒸発および燃焼する燃料液滴のマイクロ爆発発生現象は、気体中における液滴燃焼および蒸発時と同様なメカニズムで発生していると類

推される。一方噴霧燃焼では、液滴が微細であるとともに乳化構造、液滴内水分量、液滴温度は、噴霧条件、雰囲気条件の影響を受けていると考えられる。微細液滴および噴霧に対する壁面の影響については今後より詳細な検討が必要であると思われる。

4. 結 言

界面活性剤を含む *n*-ドデカン-水系水中油滴形乳化燃料液滴の高温壁面上における蒸発時および燃焼時のマイクロ爆発発生現象を統計的見地から検討した。初期直径 2 mm の乳化燃料液滴を平滑なステンレス壁面上に滴下して蒸発および燃焼させた場合について、光学的観察を行うとともにマイクロ爆発発生待ち時間を測定し、待ち時間分布に及ぼす含水率および壁面温度の影響を明らかにするとともに、マイクロ爆発発生率と液滴温度との関係を調べた。主たる結論は以下のとおりである。

(1) 水中油滴形乳化燃料液滴の蒸発および燃焼過程では、燃料液滴内部に球状の水分が存在し、その周辺部が透明なベース燃料相で覆われる。

(2) 液相分離は蒸発時、燃焼時にかかわらず、マイクロ爆発発生開始前に完了する確率が高い。

(3) ミクロ爆発発生待ち時間は、形状母数 2 のワイブル分布で近似できる。

(4) 壁面温度および含水率の上昇に伴い、マイクロ爆発発生待ち時間は短くなる。

(5) ミクロ爆発発生率と液滴温度および水分量との関係を示す実験式を得た。

文 献

- (1) Dryer, F. L., *Proc. Combust. Inst.*, **16** (1977), 279-295.
- (2) Law, C. K., ほか 2 名, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **8** (1982), 171-202.
- (3) Kadota, T. and Yamasaki, H., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **28** (2002), 385-404.
- (4) Peters, B. D. and Stebar, R. F., *SAE*, No. 760547 (1976), 1832-1853.
- (5) Greeves, G., ほか 2 名, *Proc. Combust. Inst.*, **16** (1977), 321-336.
- (6) Sjogren, A., *Proc. Combust. Inst.*, **16** (1977), 297-306.
- (7) Hall, R. E., *Trans. ASME, J. Engine Power*, **98** (1976), 425-434.
- (8) Spadaccini, L. J. and Pelmas, R., *Adv. Chem.*, **166** (1978), 232-244.
- (9) Gollahalli, S. R., ほか 2 名, *Proc. Combust. Inst.*, **18** (1981), 349-360.
- (10) Kadota, T. and Henein, N. A., *PARTICULATE CARBON Formation During Combustion*, (1981), 391-410, PLENUM PRESS.
- (11) 水谷幸夫・多木昭雄, 機論, **47**-424, B (1981), 2379-2385.
- (12) 廣安博之・ほか 2 名, 機論, **48**-430, B (1982), 1182-1186.
- (13) Lasheras, J. C., ほか 2 名, *Combust. Sci. Technol.*, **21** (1979), 1-14.
- (14) Yap, L. T., ほか 2 名, *Combust. Sci. Technol.*, **41** (1984), 291-313.
- (15) Wang, C. H., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **56** (1984), 175-197.
- (16) 木本恭司・ほか 2 名, 機論, **52**-477, B (1986), 2275-2281.
- (17) 吉本康文・ほか 2 名, 機論, **55**-519, B (1989), 3538-3543.
- (18) Avedisian, C. T. and Fatehi, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-8 (1988), 1587-1603.
- (19) Chung, S. H. and Kim, J. C., *Proc. Combust. Inst.*, **23** (1990), 1431-1435.
- (20) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **58**-546, B (1992), 582-586.
- (21) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **59**-560, B (1993), 1362-1367.
- (22) 山崎博司・ほか 2 名, 機論, **61**-583, B (1995), 1195-1200.
- (23) 津江光洋・ほか 2 名, 機論, **61**-583, B (1995), 1189-1194.
- (24) 津江光洋・ほか 2 名, 機論, **61**-587, B (1995), 2712-2717.
- (25) Tsue, M., ほか 3 名, *Proc. Combust. Inst.*, **26** (1996), 1629-1635.
- (26) Tsue, M., ほか 4 名, *Proc. Combust. Inst.*, **27** (1998), 2587-2593.
- (27) 山崎博司・ほか 3 名, 機論, **64**-618, B (1998), 562-567.
- (28) 瀬川大資・ほか 4 名, 機論, **66**-645, B (2000), 1524-1529.
- (29) Segawa, D., ほか 5 名, *Proc. Combust. Inst.*, **28** (2000), 985-990.
- (30) Yamasaki, H., ほか 3 名, *Proc. 6th APISCEU*, (2002), 111-117.
- (31) 三上真人・ほか 2 名, 機論, **64**-624, B (1998), 2690-2695.