

脂肪酸メチルエステル/水エマルジョン燃料液滴の燃焼特性に関する研究

日大生産工(院) ○池谷 洋平 鈴木 圭

日大生産工 今村 幸 山崎 博司

1. 緒言

近年、再生可能エネルギーの中の一つであるバイオディーゼル燃料(BDF)が普及しつつあり、今後も使用範囲の拡大が見込まれている。植物油をエステル化させた BDF は主成分を脂肪酸メチルエステル(以後 FAME と略記)としており、発熱量が比較的高く、カーボンニュートラルにより二酸化炭素の排出の抑制が期待できる。しかしながら、FAME に水を混入させエマルジョンとした場合についての検討は多くは行われていない。本研究は、脂肪酸メチルエステル/水エマルジョン燃料液滴の燃焼実験を行い、二次微粒化発生過程について検討しようとするものである。本報では、特に脂肪酸メチルエステル/水エマルジョン燃料におけるマイクロ爆発発生を統計的手法¹⁾により検討することで、添加成分である水がマイクロ爆発発生に及ぼす影響因子を検討し、その発生メカニズムについて知見を得ようとするものである。

2. 実験操作および方法

燃焼実験を行う際に使用する装置の概略図を Fig.1 に示す。燃焼実験装置は測定部および支持部から構成される。測定部には黄銅製円盤の中心位置に垂直に直径 150 μm の石英懸垂線を取り付けた。石英線の先端部に初期液滴直径 $d_0 = 1.3 \text{ mm}$ の燃料液滴を付着させた。液滴を付着させやすくするため懸垂線の先端を球形に加工した。可視化系は、高速度ビデオカメラと光源を用いた。高速度ビデオカメラは、フォトロン社製 FASTCAM-512 PCI を使用し、実験時の撮影速度は 500 fps とした。光源は高速度ビデオカメラの対面に設置し、液滴内の沸騰挙動及び液滴の分裂、崩壊過程を観察、記録した。点火系には小ボタン炎を使用し、液滴を瞬

時に点火後退避させた。30 個以上の液滴について点火から燃焼終了時まで液滴内で生じる現象を観察した。

ベース燃料には菜種油より生成した BDF である FAME_p, または FAME_p の主成分であるオレイン酸メチル(試薬, 以後 OME)を使用した。

乳化剤である界面活性剤には、ポリオキシエチレンアルキルエーテル(エマルゲン LS - 110 , 花王(株), HLB = 13.4, 以後 Surfactant A)を使用した。界面活性剤の含有率(体積割合)は $C_s = 0.03$ と一定として、純水、ベース燃料の混合割合を変化させエマルジョン燃料の調製を行った。純水の含有率は $C_w = 0.10, 0.20, 0.30$ と変化させ、それに伴い、ベース燃料の割合を $C_f = 0.87, 0.77, 0.67$ と変化させた。これらを所定の体積割合で混合し、マグネチックスターラで攪拌し、エマルジョン燃料を作成した。また、燃焼実験は室温、大気圧下、静止空気中で行った。

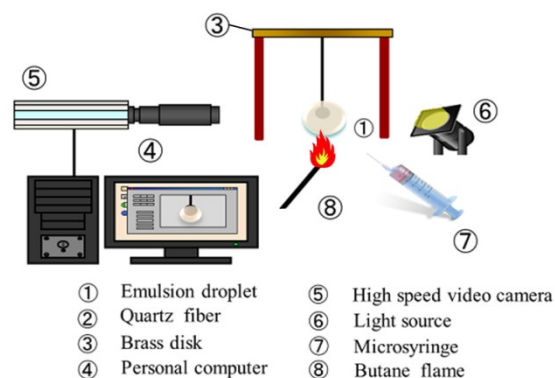


Fig.1 Schematics of experimental.

3. 統計モデル

エマルジョン燃料液滴燃焼時のマイクロ爆発発生までの待ち時間分布は、横軸を初期のマイクロ爆発発生を起点とした相対待ち時間についてワイブル分布で整理できることが既往の検討²⁾により知られている。

Study on secondary combustion characteristics of a fatty acid methyl ester/water emulsion droplet

Yohei IKEGAYA, Kei SUZUKI, Osamu IMAMURA, Hiroshi YAMASAKI

ここでは、マイクロ爆発発生待ち時間分布をワイブル分布を用いて統計的に検討する。式(1)～(3)にワイブル分布の分布関数、待ち時間および発生確率を示す。

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

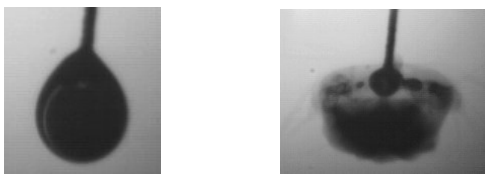
$$\tau_t = \tau_w + \tau_0 \quad (2)$$

$$J = \frac{m\tau_w^{m-1}}{\alpha^m} \quad (3)$$

ここで、 F 、 J はそれぞれ事象発生分布関数および事象の発生確率であり、 m 、 α はワイブル分布における形状母数、尺度母数である。また、 τ_t 、 τ_0 は、全待ち時間(液滴寿命)および最小待ち時間であり、この両者よりワイブル分布における発生待ち時間 τ_w を定義した。本報では、既報と同様に全待ち時間は点火から発生までの経過時間、最小待ち時間 τ_0 は全待ち時間分布関数と横軸との交点を用いた。

4. 実験結果および考察

Fig.2に含水率 $C_w = 0.30$ におけるOME/水エマルジョン単一液滴の二次微粒化過程の写真を示す。(a)は点火後の燃焼初期の写真であり、油相内に添加成分である水分が凝集していることがわかる。(b)はマイクロ爆発発生瞬間である。マイクロ爆発の発生に伴い、液滴が微細化されていることがわかる。



(a) Water coagulation in a burning emulsion droplet (b) Instant of micro-explosion

Fig.2 Hi-speed video images of prior to and instant of secondary atomization of a burning OME/water emulsion

Fig.3に含水率 $C_w = 0.30$ のOME/水エマルジョンを含む、エマルジョン化させていないベース燃料液滴の燃焼過程における液滴直径の経時変化を示す。縦軸は液滴直径 d の2乗値、横軸は点火を起点とした時間 t_b であり、両者とも初期液滴直径 d_0 の2乗値で規格化

されている。図より燃焼初期において燃焼速度定数に対するベース燃料変化または乳化の有無の影響は小さい。Fig.4に含水率 $C_w = 0.30$ のFAME_p/水エマルジョンを含む、OME/水エマルジョン燃料の液滴燃焼過程における液滴直径の変化に対する含水率の影響を示す。図より、燃焼速度定数に対する含水率の影響は小さいことがわかる。また、含水率 $C_w = 0.30$ のFAME_p/水エマルジョンおよびOME/水エマルジョンにおいて、燃焼速度定数に対するベース燃料変化の影響は小さい。

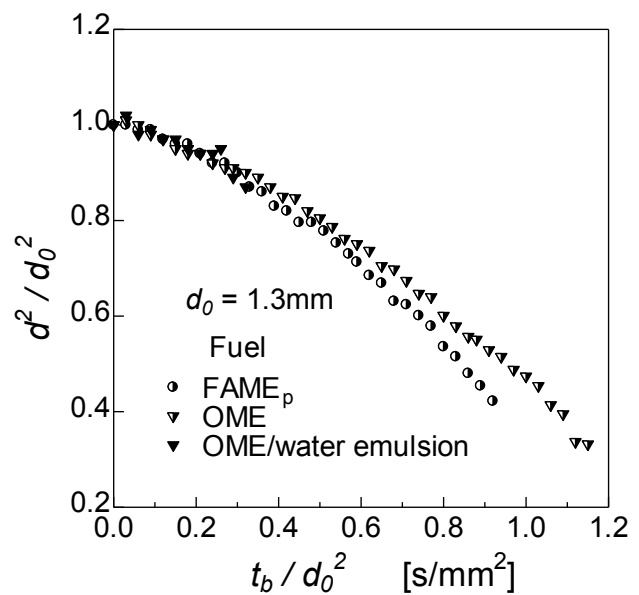


Fig.3 Time histories of squared droplet diameter of a burning FAME_p or OME with a OME/water emulsion droplet of $C_w = 0.30$.

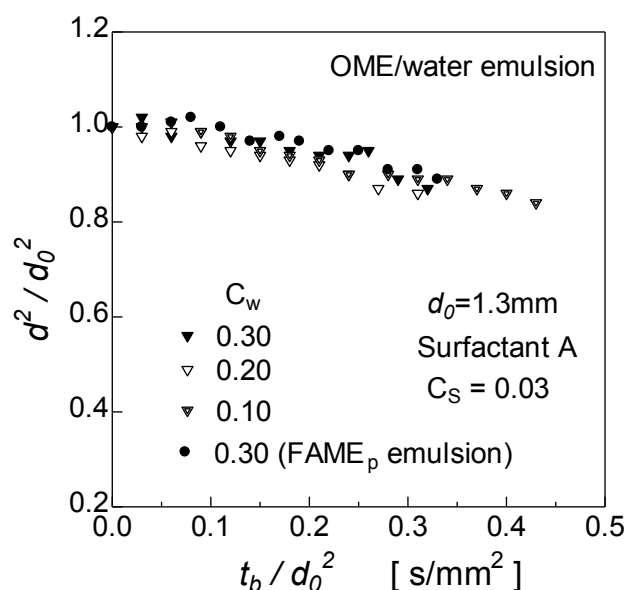


Fig.4 Time histories of squared droplet diameter of a burning OME/water emulsion droplet with a FAME_p/water emulsion droplet of $C_w = 0.30$.

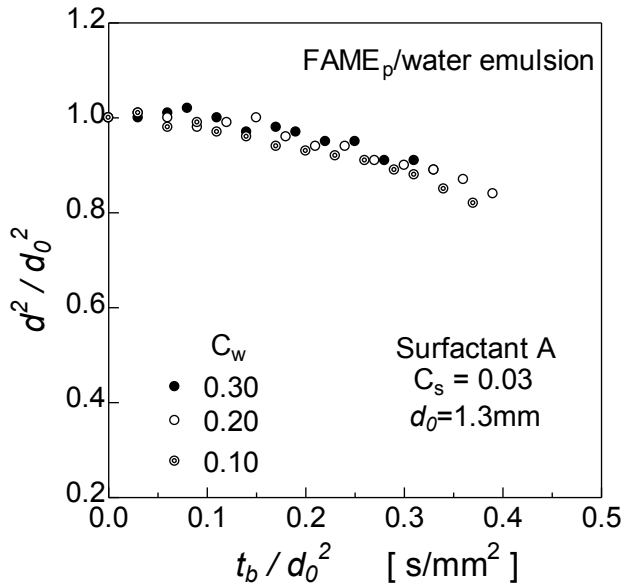


Fig.5 Distribution function of micro-explosion events in a burning FAME_p/water emulsion droplet.

Fig.5 に FAME_p/水エマルジョン燃料液滴の燃焼過程における液滴直径の変化に対する含水率の影響を示す。図より燃焼速度定数に対する含水率の影響は小さいことがわかる。したがって、Fig.3, 4 および 5 より、OME/水エマルジョンおよび FAME_p/水エマルジョンにおいて、エマルジョン化の有無、およびベース燃料変化または含水率変化は、燃焼初期における燃焼速度定数への影響が小さいことが考えられる。これは、燃焼初期に添加成分である水分が液滴内に凝集し、その後の燃焼過程には大きく影響しないものと考えられる。

Fig.6 に含水率 $C_w = 0.30$ の FAME/水エマルジョンにおける液滴寿命分布に対するベース燃料の影響を示す。縦軸は分布関数 F 、横軸は液滴寿命 τ_t [s] である。図より液滴寿命において両者は類似した分布を示している。

Fig.7 に OME/水エマルジョン燃料における液滴寿命分布に対する含水率の影響を示す。OME/水エマルジョンにおける含水率 $C_w = 0.10$ が他の含水率に比べ液滴寿命が長い理由として、乳化相の分離など液滴内の移動現象が影響していると推察できる。

Fig.8 に FAME_p/水エマルジョン燃料における液滴寿命分布に対する含水率の影響を示す。液滴寿命分布において、含水率 $C_w = 0.30$ のエマルジョン燃料は他含水率よりわずかに左に分布しているが、含水率の影響は小さいものといえる。

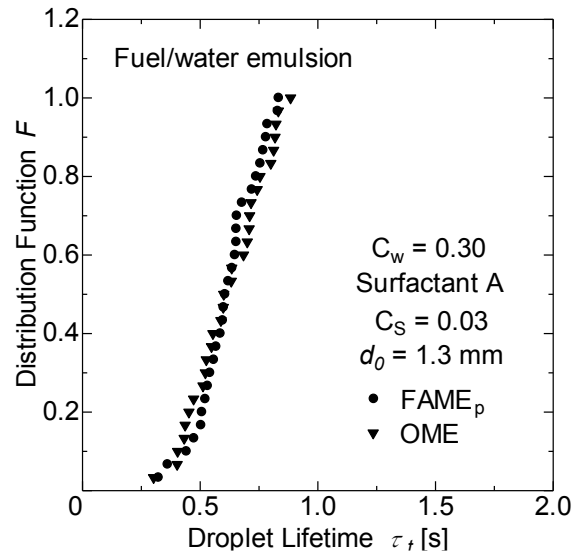


Fig.6 Distribution function of micro-explosion events in a burning FAME/water emulsion droplet of $C_w = 0.30$.

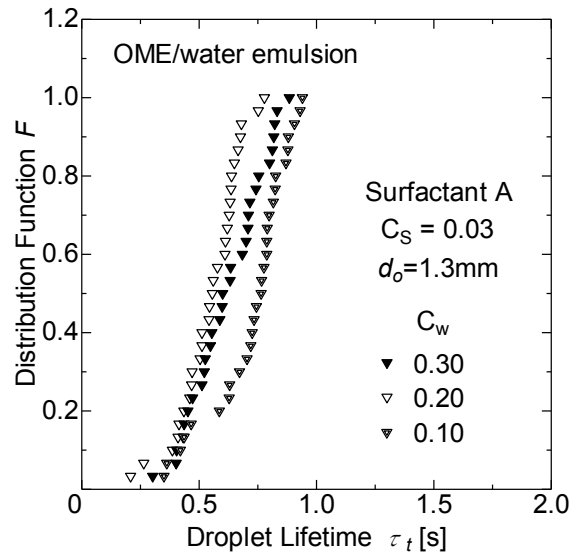


Fig.7 Distribution function of micro-explosion events in a burning OME/water emulsion droplet.

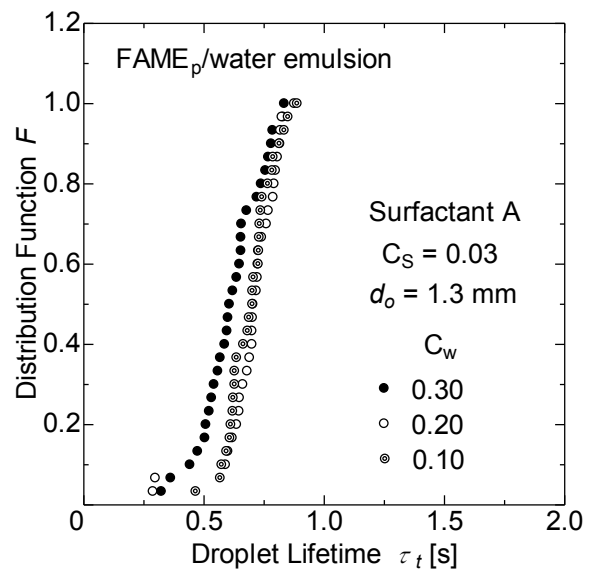


Fig.8 Distribution function of micro-explosion events in a burning FAME_p/water emulsion droplet.

Fig.9に OME/水エマルジョン燃料液滴の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ワイブル確率紙上にプロットしたものを示す. 縦軸は分布関数 F , 横軸は発生待ち時間 τ_w [s] である. 含水率 $C_w = 0.30$ では形状母数は $m = 0.8$ の直線で近似できることから初期故障型, 含水率 $C_w = 0.20$ において形状母数は $m = 1.0$ と偶発故障型であることがわかる. 他方で, 含水率 $C_w = 0.10$ においては, 分布は折れ線で近似できることから複合型ワイブル分布であり, 性状の異なる発生要因に基づく可能性が高い. しかしながら, 図より各含水率において発生要因の異なる点が存在していることがわかる. そこで, 最小待ち時間 τ_0 を全待ち時間分布関数と横軸との交点ではなく, それら性状の異なる発生要因となる点を除いた位置として定義し, ワイブル確率紙上にプロットしたものを Fig.10 に示す. これにより, 各待ち時間分布は形状母数 $m = 1.0$ の直線で近似できることから偶発故障型であると推察できる. 既報¹⁾より炭化水素/水エマルジョン液滴でのマイクロ爆発発生は液滴内の低沸点成分量とその低沸点成分の過熱度によって整理されることが知られている. 本研究で用いた FAME/水系においては, FAME の分子構造が有する親油, 親水性の影響による相分離過程, すなわち液滴内部における移動現象についての相異が予測できる. しかしながら, ミクロ爆発発生を支配している初期気泡核発生への影響因子としては, 既報と同様なものの以外には考えられない. 可視化結果から低沸点成分が影響しないことから, 本研究で取り扱うマイクロ爆発発生は水の過熱度すなわち液滴温度に支配されると考えられる. このことより, これら範囲において温度一定領域内でマイクロ爆発が発生したものと考えられる.

5. 結言

脂肪酸メチルエステル/水エマルジョン燃料液滴の燃焼特性について以下の知見を得た.

- (1) OME/水エマルジョン燃料液滴の発生待ち時間は, 性状の異なる発生要因の点を除くと偶発故障型のワイブル分布で近似することが出来る.
- (2) 脂肪酸メチルエステル/水エマルジョン燃料液滴における燃焼速度定数に対する含水率の影響は小さい.

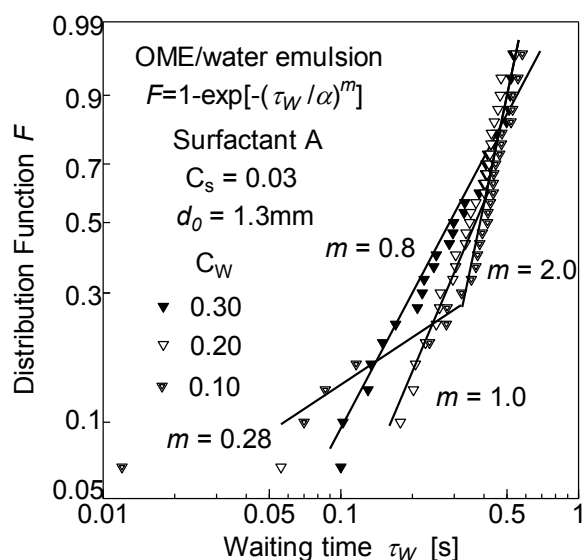


Fig.9 Weibull plot of distribution function of occurrence of micro-explosion of OME/water emulsion droplet.

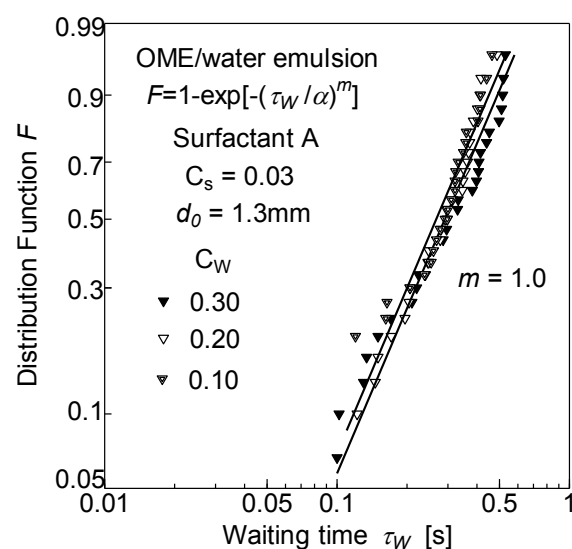


Fig.10 Weibull plot of distribution function of occurrence of micro-explosion of OME/water emulsion droplet.

6. 参考文献

- 1) Kadota, T. and Yamasaki, H., Prog. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. Prog Energy Combustion Science 2002;28;385-404
- 2) 山崎, 他 4 名, エマルジョン燃料液滴燃焼時の二次微粒化過程に対する AE 計測の適用, 日本エネルギー学会誌, 93 号, pp.127-134(2014)

謝辞

本研究で用いた界面活性剤は花王(株)よりサンプル提供されたものである. 記して謝意を表する.