高温壁面上で蒸発する乳化燃料液滴のマイクロ爆発 に及ぼす雰囲気圧力の影響*

田中 創^{*1}, 角田 敏一^{*1}, 瀬川 大資^{*1}
中谷 辰爾^{*1}, 山崎 博司^{*2}

Effect of Ambient Pressure on Micro-Explosion of an Emulsion Droplet Evaporating on a Hot Surface

Hajime TANAKA, Toshikazu KADOTA^{*3}, Daisuke SEGAWA,
Shinji NAKAYA and Hiroshi YAMASAKI

^{*3}Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University,
1-1 Gakuen-cho, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

An experimental study has been carried out to reveal the statistical characteristics for the onset of micro-explosion of an emulsion droplet evaporating on a hot surface under high pressure conditions. The oil-in-water emulsion consisting of base fuel and water doped with small amount of surfactant is tested after degasification. The base fuels employed are *n*-hexadecane, *n*-tetradecane and *n*-dodecane. The water content of emulsions is varied from 0.1 to 0.2 by volume. Experiments are made at various surface temperatures and ambient pressures. The Weibull analysis is applied to obtain the distribution function of the waiting time for the onset of micro-explosion and to derive the empirical formula for the rate of micro-explosion as a function of water volume and emulsion temperature. The results show that the waiting time is correlated well with the Weibull distribution of the wear-out type. The waiting time decreases with an increase in the ambient pressure, saturation temperature of base fuel, water content and surface temperature. An empirical formula is proposed for the rate of micro-explosion as a function of water volume and emulsion temperature.

Key Words: Liquid Fuel, Evaporation, Diesel Engine, Emulsion Droplet, Micro-Explosion, Hot Surface, High Pressure, 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蒸発過程では、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。二次微粒化は、燃料と空気との混合および蒸発を促進し、窒素酸化物・すす・未燃炭化水素の発生を抑制することが知られている。ディーゼル機関、ガスタービンなどの燃焼室内では、高圧・高温の雰囲気中に供給された燃料噴霧の一部が高温壁面に衝突し蒸発する。高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発現象に関する知見は、これら機関における混合気形成・燃焼・有害物質生成機構を解明するうえで重要な役割を果たすと考えられる。

乳化燃料の蒸発および燃焼に関する研究は従来より数多く行われてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾が、高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発および燃焼に関する報告は限られている。木本ら⁽⁴⁾、吉本ら⁽⁵⁾、Avedisianら⁽⁶⁾、Chung

ら⁽⁷⁾による実験的検討がなされているが、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。乳化燃料液滴におけるマイクロ爆発発生は、ベース燃料と水が関与する液相内輸送過程、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。

著者らは、高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発および燃焼時におけるマイクロ爆発発生機構やその統計的性質の解明を目的とした基礎的研究を行ってきた。前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾では、乳化燃料液滴の蒸発および燃焼時におけるマイクロ爆発発生現象の統計的性質およびそれらに及ぼす含水率、ベース燃料性状および壁面温度の影響を明らかにした。

本報では、高温壁面上における水中油滴形乳化燃料液滴蒸発時のマイクロ爆発に及ぼす雰囲気圧力の影響を明らかにすることを主目的とした。雰囲気圧力を大気圧から0.3 MPaまで変化させ、初期直径2 mmの乳化燃料液滴を高温壁面上に滴下し、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。統計的手法を用いて待ち時間分布の解析を行うとともに、マイクロ爆発に及ぼす雰囲気圧力、ベース燃料性状、含水率および壁面温度の影響を明らかにした。

* 原稿受付 2005年5月19日。

^{*1} 正員、大阪府立大学大学院工学研究科(〒599-8531 堺市学園町1-1)。

^{*2} 正員、日本大学生産工学部(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)。

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

2. 測定および統計処理

図1は、高圧容器(以下、容器)、高温壁面ブロック、加熱器、壁面温度測定用熱電対、乳化燃料液滴温度測定用熱電対、燃料供給装置、乳化燃料液滴(以下、燃料液滴)、ビデオカメラおよび温度記録系から構成される実験装置の概略である。容器は内径100 mm、高さ250 mmの円筒形であり、直径30 mmの観察用窓が2対設けられている。図1には示していないが、容器の上部フランジには、燃料供給装置および容器内と燃料供給装置を冷却するための水冷配管が取り付けられている。高温壁面ブロックは直径40 mm、高さ50 mmのSUS 304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。壁面ブロック周囲には、カンタル線およびセラミック管から構成される環状加熱器を設置し、その外周に厚さ15 mmの断熱材を巻いている。さらにその外周には、容器内冷却のため、下部フランジに取付けた水冷配管が設置されている。上部および下部フランジに取付けられた水冷配管により、実験中の容器内気体および燃料供給装置の温度上昇が抑制された。環状加熱器への入力電圧を調整することにより壁面温度を制御した。壁面ブロックの中心軸に沿って表面から下方5, 10 mmおよび15 mmの3箇所にR形熱電対の高温接点を設置されており、これら3点における測定温度を外挿することにより壁面温度を決定した。

ベース燃料として、*n*-ヘキサデカン(標準沸点, 560 K)、*n*-テトラデカン(526.7 K)および*n*-ドデカン(489.5 K)を供試した。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)]を選んだ。ベース燃料、蒸留水および界面活性剤を所定の体積割合で混合し、マグネチックスターラでかくはんして、水中油滴形の乳化燃料(以下、燃料)を調製した。燃料調製時における燃料中の蒸留水の体積割合を初期含水率とする。なお、燃料に対する混入体積割合を0.01とした。燃料調製後、減圧脱気を行った後に実験に供した。

容器に所定の雰囲気圧力まで窒素を充てんし、壁面温度が所定の定常値に達した後、壁面上方約10 mmに位置する燃料供給装置の先端から燃料液滴を滴下し、蒸発する燃料液滴の挙動をビデオカメラ(30 frames/s)により撮影した。撮影結果から、燃料液滴のマイクロ爆発発生待ち時間を決定した。なお、各条件において30~50回の測定を行った。また、壁面近傍上方に設置した線径50 μm のR形熱電対を用いて、燃料液滴が壁面に接触してからマイクロ爆発するまでの

Fig. 1 Experimental apparatus

全期間における燃料液滴温度を測定した。

燃料液滴の初期直径は2 mm一定とし、初期含水率を0.1および0.2とした。壁面温度の範囲は、球状蒸発領域の最低温度である650 Kから、実験装置の安全性が確保できる800 Kまでとし、雰囲気圧力は大気圧から0.3 MPaまで変化させた。

ワイブル分布⁽¹⁰⁾を用いてマイクロ爆発発生待ち時間分布を統計的に解析した。

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

$$\tau_i = \tau + \tau_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau^* = \frac{\alpha}{m} \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_i^* = \tau^* + \tau_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$J = \frac{m\tau^{m-1}}{\alpha^m} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 F : 待ち時間分布関数、 τ : 待ち時間、 m : 形状母数、 α : 尺度母数、 τ_i : 全待ち時間、 τ_0 : 最小待ち時間、 τ^* : 平均待ち時間、 τ_i^* : 平均全待ち時間、 J : ミクロ爆発発生率である。なお、全待ち時間 τ_i 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期間である。最小待ち時間 τ_0 は、各条件下における全待ち時間 τ_i の最小値であり、後述するように、全待ち時間 τ_i の分布曲線より決定する。

3. 測定結果および考察

これまでの研究から、大気圧下での高温壁面上における燃料液滴の蒸発および燃焼中に油相と水相の相分離が生じることが報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかしながら、雰囲気圧力が変化した場合にこれら両相がどのような挙動を示すかについてはいまだ報告されていない。そこで、まず燃料液滴の液相挙動について光学的観察を行った。図2は、雰囲気圧力0.3 MPa、初期含水率(以下、含水率)0.2、壁面温度800 Kにおける*n*-ヘキサデカンをベース燃料とする燃料液滴の映像である。

Fig. 2 Phase separation (*n*-Hexadecane/water, $C_w = 0.2$, $P_a = 0.3$ MPa, $T_p = 800$ K)

燃料液滴中心部に球状の白濁滴が存在し、その周辺が透明な相で覆われている。内部の白濁滴には凝集した水と界面活性剤が含まれ、透明な相はベース燃料に相当する。本実験で対象とした全条件においても、このような相分離現象がマイクロ爆発発生以前に生じていることが観察された。

図3は、含水率0.2、壁面温度800 Kにおける*n*-ヘキサデカンベース燃料とした場合の全待ち時間分布に及ぼす雰囲気気圧の影響を示したものである。横軸は全待ち時間 τ_t であり、縦軸は全待ち時間 τ_t の分布関数 F である。分布曲線は全待ち時間 τ_t の短い領域で緩やかに増大した後、急激な増大期間を経て再び緩やかに増大する。雰囲気気圧が高くなると分布曲線は左方へ移行し、全待ち時間 τ_t は短くなる。図3中の分布曲線と時間軸の交点を式(2)および式(4)中の最小待ち時間 τ_0 とした。

図4は、図3の結果をワイブル確率紙上にプロットしたものである。ただし、図4の横軸は待ち時間 τ である。ワイブル確率紙上では待ち時間 τ の測定点がほぼ直線で整理されることがわかる。さらに、異なる雰囲気気圧に対応する3本の直線のこう配はほぼ等しい。これら直線に対応する形状母数 m はほぼ2.0で近似でき、マイクロ爆発の発生機構は摩耗故障形に分類される。摩耗故障形ワイブル分布とは、ある事象の発生要因が時間とともに増大する場合に対応する。

図3より求めた τ_0 および図4より求めた m ならびに α を式(3)および式(4)に代入することにより、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* を求めた。図5は、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* に及ぼす雰囲気気圧の影響を示したものである。雰囲気気圧が高くなると、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* は減少することがわかる。

図6にマイクロ爆発発生率 J の経時変化を示す。各雰囲気気圧におけるマイクロ爆発発生率 J と待ち時間 τ は両対数グラフ上でそれぞれ直線関係を示すことがわかる。また、雰囲気気圧が高くなるにつれて、ミクロ

Fig. 3 Effect of ambient pressure on distribution function of total waiting time

Fig. 4 Effect of ambient pressure on Weibull plot of waiting time

Fig. 5 Relationship between ambient pressure and mean waiting time

爆発発生率 J の時間変化は増大する。燃料液滴温度は時間の経過とともに上昇し、雰囲気気圧の上昇とともに、その時間変化が増大し同一時刻における燃料液

Fig. 6 Time histories of rate of micro-explosion

Fig. 7 Effect of base fuel on Weibull plot of waiting time

滴温度が上昇した。その結果、マイクロ爆発発生率 J は時間の経過とともに上昇し、同一時刻におけるその値は雰囲気圧力の上昇とともに増大したものと考えられる。

図7は、雰囲気圧力 0.2 MPa、含水率 0.2、壁面温度 800 K における待ち時間分布に及ぼすベース燃料性状の影響を示したものである。異なるベース燃料に対応する3本の直線のこう配はほぼ等しい。これら直線に対応する形状母数はほぼ2.0で近似でき、マイクロ爆発の発生機構は摩耗故障形に分類される。ベース燃料の飽和温度の上昇とともに、分布は左方に移行している。これは、ベース燃料の飽和温度の上昇とともに待ち時間が短くなることを表している。図8は、含水率 0.2、壁面温度 800 K におけるベース燃料を n -ヘキサデカンおよび n -テトラデカンとした場合の平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* に及ぼす雰囲気圧力の影響を示したものである。横軸は、雰囲気圧力をベース燃料の臨界圧力 P_c で無次元化した圧力比

Fig. 8 Relationship between reduced pressure and mean waiting time

Fig. 9 Relationship between saturation temperature and mean waiting time

P_a/P_c である。雰囲気圧力が高くなると、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* はともに短くなる。さらに、平均待ち時間 τ^* は、ベース燃料によらず1本の曲線上に分布している。また、ベース燃料に n -ヘキサデカンを選んだほうが n -テトラデカンの場合に比べ、平均全待ち時間 τ_t^* は短くなる。図9は、各雰囲気圧力におけるベース燃料の飽和温度と、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* の関係を示したものである。雰囲気圧力およびベース燃料によらず、平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* はそれぞれ1本の曲線で近似される。また、飽和温度の上昇とともに平均待ち時間 τ^* および平均全待ち時間 τ_t^* は短くなる。

雰囲気圧力 0.3 MPa、壁面温度 800 K における n -ヘキサデカンをベース燃料とした場合の待ち時間分布に及ぼす含水率の影響を図10に示す。それぞれの含水率に対応する2本の直線のこう配はほぼ等しい。こ

Fig. 10 Effect of water content on Weibull plot of waiting time

Fig. 11 Effect of surface temperature on Weibull plot of waiting time

れら直線のこう配に対応する形状母数 m はほぼ 2.0 で近似でき、含水率にかかわらず、マイクロ爆発の発生機構は摩耗故障形に分類される。また、含水率が増加するとともに、分布は左方に移行している。これは、含水率の増加とともに待ち時間が短くなることを表している。図 11 は、雰囲気圧力 0.2 MPa、含水率 0.2 における n -ヘキサデカンベース燃料とした場合の待ち時間分布に及ぼす壁面温度の影響を示したものである。異なる壁面温度に対応する 2 本の直線はほぼ等しいこう配をもっている。壁面温度の上昇とともに、分布は左方に移動している。他のベース燃料に対しても図 10 および図 11 と同様の結果が得られた。

均一核生成理論あるいは不均一核生成理論において、核生成率は温度の関数として表される。また、微小重力環境下および通常重力環境下での静止空気中における燃料液滴燃焼時のマイクロ爆発発生率は燃料液滴温度で整理されることが知られている⁽³⁾。そこで、本

Fig. 12 Relationship between rate of micro-explosion and emulsion temperature

研究でもマイクロ爆発発生時の燃料液滴温度を用いてマイクロ爆発発生率の整理を試みた。図 12 は、マイクロ爆発発生率 J と燃料液滴温度 T_E との関係を示したものである。なお、 T_E はマイクロ爆発発生時における燃料液滴温度である。横軸および縦軸はそれぞれ $1/T_E$ 、水分量 V_w で規格化されたマイクロ爆発発生率 J/V_w とした。壁面温度および含水率の範囲はそれぞれ 650 K から 800 K、0.1 から 0.2 である。雰囲気圧力は 0.1 MPa (大気圧)、0.2 MPa および 0.3 MPa とした。なお、大気圧の場合におけるデータは、既報⁽⁹⁾ より引用したものであり、燃料液滴蒸発時に加え燃料液滴燃焼時も含んでいる。図 12 中の点は 1 本の直線で整理されることから、本実験の範囲内では、マイクロ爆発発生率 J は式 (6) で整理される。

$$J = KV_w \exp\left[-\frac{A}{T_E}\right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K および A は実験定数である。ベース燃料、含水率、壁面温度および雰囲気圧力などによってマイクロ爆発発生待ち時間は変化するが、マイクロ爆発発生率 J はマイクロ爆発発生時の燃料液滴温度 T_E で整理できることを示している。式 (6) は静止空気中における懸垂燃料液滴燃焼時におけるマイクロ爆発発生率の実験式⁽³⁾と類似である。このことより、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機構は、静止空気中で燃焼する燃料液滴のそれと同様であると類推される。

4. 結 言

高温壁面上で蒸発する水中油滴形乳化燃料液滴のマイクロ爆発に及ぼす雰囲気圧力の影響を明らかにすることを主目的として実験を行った。雰囲気圧力を大気圧

から 0.3 MPa まで変化させ、初期直径 2 mm の乳化燃料液滴を高温壁面上に滴下し、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。統計的手法を用いて待ち時間分布の検討を行い、マイクロ爆発に及ぼす雰囲気圧力、ベース燃料性状、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および水分量との関係を調べた。本実験の範囲内で得られた結論は次のとおりである。

(1) 高圧下においても、大気圧下と同様にマイクロ爆発発生以前に相分離現象が観察された。

(2) ミクロ爆発発生待ち時間分布は、形状母数 2 の摩耗故障形ワイブル分布で整理できる。

(3) 雰囲気圧力の上昇とともに、待ち時間は短くなる。

(4) 平均待ち時間および平均全待ち時間とベース燃料の飽和温度との関係は、雰囲気圧力およびベース燃料性状にかかわらず、それぞれ 1 本の曲線で整理される。

(5) ベース燃料の飽和温度、含水率および壁面温度の上昇に伴い、待ち時間は短くなる。

(6) ミクロ爆発発生率と液滴温度および水分量との関係は次の実験式で整理される。

$$J = KV_w \exp\left[-\frac{A}{T_E}\right]$$

文 献

- (1) Dryer, F. L., Water Addition to Practical Combustion Systems-Concepts and Applications, *Proc. Combust. Inst.*, **16** (1977), 279-295.
- (2) Law, C. K., ほか 2 名, Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **8** (1982), 171-202.
- (3) Kadota, T. and Yamasaki, H., Recent Advances in the Combustion of Water Fuel Emulsion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **28** (2002), 385-404.
- (4) Kimoto, K., ほか 2 名, The Vaporizing Behavior of the Oil Droplet of Water-in-Oil Emulsions on the Hot Surface, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B)*, **52**-477 (1986), 2275-2284.
- (5) Yoshimoto, Y., ほか 2 名, Studies on the Microexplosion of Emulsified Fuels (1st Report, Effects of Fuel Properties, Water Contents, and Particle Sizes on the Microexplosion on a Hot Surface), *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B)*, **55**-519 (1989), 3538-3543.
- (6) Avedisian, C. T. and Fatehi, M., An Experimental Study of the Leidenfrost Evaporation Characteristics of Emulsified Liquid Droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-8 (1988-8), 1587-1603.
- (7) Chung, S. H. and Kim, J. C., An Experiment on Vaporization and Microexplosion of Emulsion Fuel Droplets on a Hot Surface, *Proc. Combust. Inst.*, **23** (1990), 1431-1435.
- (8) Tanaka, H., ほか 4 名, Statistical Analysis of Micro-Explosion of an Emulsion Droplet Evaporating and Burning on a Hot Surface, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B)*, **70**-694 (2004), 1577-1582.
- (9) Tanaka, H., ほか 4 名, Effects of Fuel Properties, Water Contents and Surface Temperatures on Micro-Explosion of Emulsion Droplets Burning on a Hot Surface, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. B)*, **71**-702 (2005), 690-695.
- (10) Weibull, W., A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *J. Appl. Mech.*, **18** (1951), 293-297.