高圧下の乳化燃料液滴のマイクロ爆発*

張 瓏**・ 松本隆一***
清水弘一****

Micro-explosion of Emulsion Fuel Droplet under High Pressure

By Zhang Long, Ryuichi Matusmoto and Koichi Shimizu

This Paper deals with the micro-explosion of a single emulsion droplet in high pressure and high temperature. From the analysis of simplified models and the observations of the vapor bubbles in the droplet of diesel fuel and of the micro-explosion of a single emulsion droplet, the main results are as follows;

(1) In high pressure (3 MPa), the phenomena of micro-explosion are observed. From the temperature characteristics of a droplet, it is reasonable to expect that micro-explosions can occur at higher pressure.

(2) By increasing the pressure, forming of vapor bubbles is advanced while the vapor growth rate decreases, but formation of vapor bubbles is not inhibited up to 3MPa.

1. ま え が き

単一乳化燃料液滴の燃焼時に発生するマイクロ爆発現象の研究は多くの研究者によりなされてきた¹⁾²⁾³⁾。特に、マイクロ爆発時の燃料液滴の微細化による液滴の燃焼の促進作用は、実際の噴霧燃焼時にも期待されるので、これらの研究は大いに注目されている。高圧下のマイクロ爆発の可能性は理論的にも指摘され⁴⁾、S.R.Gollahalliら⁵⁾およびC.H.Wangら⁶⁾の実験でもある圧力範囲においてマイクロ爆発が確認されている。しかし、S.R.Gollahalliらはマイクロ爆発の結果を炎の形から判断していること、また、C.H.Wangらの実験は最高圧力が0.5MPaまでであることから、高圧下の実験は十分とは言えずなお研究の余地があると考えられる。

以上のことから、本研究では、まず、簡単なモデルに基づいて乳化燃料液滴内部の気泡成長に及ぼす圧力の影響を定性的に検討すると共に、高温、高圧燃焼容器における単一乳化燃料液滴の燃焼挙動の可視化実験の結果より、乳化燃料液滴のマイクロ爆発に及ぼす圧力の影響を調べた。

2. 理論的検討

多くの研究から、乳化燃料液滴のマイクロ爆発は、過熱された乳化燃料液滴中で何らかの原因で気泡核が発生し、

これが成長して起こるとの考え方がほぼ定着している。液体中の気泡の成長については、古くからキャビテーションの問題として取上げられている。乳化燃料液滴中における気泡核の成長も、本質的にはキャビテーションと同じ現象として考えられるので⁷⁾、ここでは、まず、簡単なモデルを用いて、乳化燃料のマイクロ爆発に及ぼす圧力の影響を定性的に検討する。

2.1 気泡の成長モデル 気泡の成長モデルについては、既に多くの研究者により行われているが⁸⁾、代表的なものとしては図1に示すように、(a)の慣性モデル (inertia controlled model) と (b)の拡散モデル (diffusion controlled model)の二種類が考えられている⁹⁾。これらのモデルでは、気泡の成長に及ぼす圧力の影響を検討するため、次のような仮定を設けている。

(1) 燃料液滴内部に予め気泡が存在し、その気泡は臨界気泡より大きい ($R_0 < R_c$) とする。さらに、 $\rho_m \gg \rho_e$, $R_d \gg R$, $R \gg R_0$ とする。

図1 気泡の成長モデル

* 原稿受付 昭和63年 6 月24日

昭和63年 春学期学術講演 (昭和63年 5 月17日)

** 学生会員 神戸大学 (神戸市灘区六甲台町)

*** 正会員 神戸大学 (神戸市灘区六甲台町)

**** 神戸大学 (神戸市灘区六甲台町)

(2) 気泡は完全な球形で、気泡の浮力や成長中の移動はこれを無視する。また、気泡内の圧力、温度及び気泡周囲の燃料の温度、圧力は一定とする。気泡の成長に及ぼす粘度、表面張力の影響はこれを無視する。

以上の仮定下での解析の結果を以下に示す。

慣性モデルについては、Rayleigh¹⁰⁾の漸近解として、次の式が得られている。

$$R = (2/3)^{0.5} \cdot ((P - P_{\infty}) / \rho_m)^{0.5} \cdot \tau \quad (1)$$

拡散モデルは、Plesset と Zwick¹¹⁾によって解析され、その結果は次式のように表すことができる。

$$R = \lambda \cdot (T_m - T_b) / (\rho_s \cdot L \cdot \alpha^{0.5}) \cdot (\pi/12)^{0.5} \cdot \tau^{0.5} \quad (2)$$

2.2 計算結果 両モデルにおいて、気泡の成長に及ぼす圧力の影響を定性的に検討するため、任意圧力下の気泡の半径 R と常圧下の気泡半径 R_a の比 (R/R_a) を比較する。なお、この時気泡周囲の燃料温度 T_m は理論的気泡発生過熱温度 270°C ⁴⁾ に一定に保たれるものとし、式(1)の気泡内部蒸気圧力 P は T_m における蒸気の飽和圧力 P_{sat} に等しいものとし、また、圧力による ρ_m , α , λ の変化はこれを無視する。

図2 R/R_a に及ぼす圧力の影響

図2に圧力による R/R_a の変化を示す。この図で明らかに、両モデル共に圧力の増加に伴い R/R_a の値が減少している。また、慣性モデルの場合に比べて、拡散モデルの場合は、 R/R_a に及ぼす圧力の影響が大きく、圧力が高くなると R/R_a は急激に小さい値を示す。

マイクロ爆発は乳化燃料液滴内部の水滴の気化によるもので、マイクロ爆発の強さはこれらの水滴の気化の速さ、即ち気泡の成長率 ($dR/d\tau$) に比例すると考えられる。 $dR/d\tau$ は式(1)あるいは式(2)から求められるべきであるが、式中の $T_m - T_b$, $P - P_{\infty}$, ρ , α 等は液滴加熱条件により異なるとともに、時間的にも変化し、かつ、高圧における信頼すべきこれら物性値も現在未だ得られていないので、本研究では取扱の簡単化のため、式(1)および(2)から得られた R/R_a と圧力の関係を示す図2を用いて考察を行うことにする。

図2によると、圧力が高くなると R/R_a は小さくなる。すなわち $\Delta\tau$ 時間後の気泡径は、高圧の時ほど小さ

い。換言すれば気泡成長率は小さいといえる。したがってマイクロ爆発の強さは弱くなることが推定できる。しかし、図2の圧力範囲では、 R/R_a は零ではないため、圧力が高くなっても燃料液滴のマイクロ爆発の可能性は残っていることを示唆している。なお、この計算では、 T_m を 270°C 一定としたが、実際の燃料液滴の温度として、例えば沸点をとるとすると沸点は圧力の増加に伴い増加するため、 270°C を超えることもありうる。この場合、 R/R_a は更に大きくなることが式(1)と式(2)からわかる。

更に、図1、式(1)と式(2)の比較、及び図2からわかるように、拡散モデルの場合は、気泡内部蒸気圧 P と周囲の圧力 P_{∞} との差は少なく、また、 R は時間の0.5乗の関数であるため、気泡の成長はかなり遅く、特に、圧力が高くなると R/R_a が急激に小さくなることから、高圧では激しいマイクロ爆発はあまり期待できないと考えられる。これに対し、慣性モデルでは拡散モデルより気泡径が大きく、したがって高圧下でもマイクロ爆発の存在が予想される。

3. 実験

実験は、先ず可視化により、高圧下の燃料液滴内部の微小水滴からの気泡の発生を確認するとともに、定性的に気泡の発生と成長に及ぼす圧力の影響を調べた。また乳化燃料液滴を用いて、高圧下のマイクロ爆発を観察するとともに、液滴温度履歴より、マイクロ爆発に及ぼす圧力の影響を検討した。同時に、高圧下のマイクロ爆発に及ぼす水添加率、炉内温度、界面活性剤などの影響についても実験的に調査した。

3.1 実験装置と実験方法 実験装置は図3に示すように既報のものと同じである¹²⁾。圧力容器1は、3 MPa 以上に耐えられるように設計した円筒型容器である。燃料液滴の加熱は、炉心管表面に固定した8本のニクロムヒータにより行う。また、懸垂装置4に吊した燃料液滴の挙動は、ビデオカメラ7で撮影し、ビデオレコーダー10に記録した。実験方法も既報のもの¹²⁾と同じである。図4に圧力容器の圧力・温度特性を示す。圧力 P_0 は、ブルドン管式圧力計18により、また温度 T_0 は、燃焼実験時に燃料液滴を吊す位置で素線径 $76\ \mu\text{m}$ の白金・白金ロジウム熱電対3により測定した。なお、図4に記した P_0 は加熱開始時の圧力容器内部の初期圧力である。本実験での最高圧力については P_0 が $2.1\ \text{MPa}$ の場合、加熱開始3秒後で $3\ \text{MPa}$ を超えている。

燃料は、A重油に10, 20, 30および40 Vol. %の水を添加し、ハニカムミキサーにより製造したW/O乳化燃料(A重油; 比重: 0.868, 粘度: $3.62 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$, I.B.P.: 225°C)である。燃料の安定性を保つため、0.4 Vol. %の界面活性剤(TC-600, 異工業(株)製)を混入した¹²⁾。また、液滴内部の気泡の観察には軽油(比重: 0.856, 粘度: $2.5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$, I.B.P.: 180°C)を使用した。

1-Furnace, 3-Thermocouple, 4-Suspension device, 7-Video camera, 10-Video recorder, 11-Video display, 12-Photocorder, 18-Pressure gage.

図3 実験装置の概略

1 Suspension Device
2 Droplet of Light Fuel
3 Water Particle

図5 液滴内部の気泡発生観察装置

図4 実験炉の温度・圧力特性

3.2 液滴内部の気泡の観察 前述のモデルによる気泡径の解析では、気泡核は予め燃料液滴内に存在すると仮定した。しかし、気泡核の発生機構は複雑で、未だ十分解明されておらず、実際の乳化燃料液滴の場合、液滴内に浮遊する水滴から気泡が発生するかどうかを実験的に確認する必要がある。本実験では、先ずこの確認を行った。すなわち、図5に示すように懸垂装置の先端に吊した軽油液滴の下部に、懸垂装置壁面に接しないように注意して挿入した単一の微小水滴（300-400 μm ）から、懸垂装置に影響されずに気泡が発生するかどうかを確かめた。なお、このとき、圧力容器には空気の代わりに窒素を充填し、燃料液滴が発火せず蒸発のみ起こるようにし、液滴内部の様子を撮影した。

まず、軽油のみの場合には、液滴の蒸発開始から消滅まで軽油液滴のどこにも気泡の発生は認められなかった。しかし、軽油滴の下部に微小水滴を入れたときには、常圧の場合、ある加熱時間後液滴の下部に、気泡発生の気配が現れるや否や、一瞬のうちに飛び散って、本実験の30こま/秒の撮影速度では気泡の存在ははっきりとは撮影できなかった。しかし、炉内圧力が高くなると、軽油液滴内部に気泡が明らかに観察された。例えば、 $P_s = 1.6 \text{ MPa}$ と 2.1 MPa の場合には、加熱開始約4秒後（この時の炉内圧力はそれぞれ 2.6 MPa 及び 3.2 MPa を超えている（図4））に水滴の周囲に気泡が発生していることが観察され、また、発生した気泡が軽油液滴の上部へ成長して行くことや、破裂することなどが認められた。可視化結果によると、このときの気泡の数、大きさは様々である。軽油液滴内部に発生した気泡の例を図6の写真（左）とスケッチ（右）に示す（写真下の数字は加熱開始からの時間、以下同じ）。

以上の可視化実験から、本実験の圧力範囲で液滴内の水滴から気泡が発生するのでマイクロ爆発は可能であることがわかる。

気泡の成長率については、撮影速度が遅いため、定量

(左:写真, 右:写真のスケッチ)
図6 軽油液滴内部に発生した気泡の可視化結果

的な結果は得られなかったが, 同じ撮影速度で, 常圧下では液滴が一瞬に飛び散り, 気泡が観察できなかったのに対し, 炉内圧力が高くなると気泡の影像が観察されたことより高圧の場合の気泡の成長は遅いことがわかる。これは図2に示すように, R/R_0 は圧力が高くなると小

さくなることと対応している。

気泡の発生時期については, 初期圧力が高くなるにつれて, 気泡の観察された時期が早くなっている。例えば, 常圧と $P_s = 2.1 \text{ MPa}$ と比較すると, 加熱開始から, 気泡が観察されるまでの時間は, 約 0.4 秒で 2.1 MPa のほうが短い。この傾向は, C.H.Wang らの自由液面を用いたときの結果⁶⁾と同じである。

3.3 ミクロ爆発の可視化結果 乳化燃料のミクロ爆発の可視化実験には, 軽油より沸点の高いA重油の乳化燃料を使用した。著者らは加熱開始時圧力 $P_s = 1.6 \text{ MPa}$ のときにミクロ爆発の現象を確認し報告したが¹²⁾ここでは, 炉内圧力を更に高くし, $P_s = 2.1 \text{ MPa}$ まで実験を行った。図7に乳化燃料液滴のミクロ爆発の燃焼形態の例(初期液滴直径: $1200 \mu\text{m}$)を示す。この図で認められるように, 発火と同時に激しいミクロ爆発が発生している。このときの液滴発火時の炉内圧力は図4によると 3.2 MPa を超えている。前述の軽油液滴内部の気泡発生の可視化結果と併せて考えると, 高圧下の乳化燃料液滴のミクロ爆発の存在が明確である。

3.4 ミクロ爆発と気泡成長モデル 上述のように, 実験ではベース燃料としてA重油を用いた。A重油と水の沸点間には相当差があるので, 液滴加熱時の両者の温度差は大きく, 前述の気泡成長モデルで言うところの, 気泡内圧力として液温に対応する飽和蒸気圧を考えた慣性モデルが現象をよく表わすと考えられる。この点からも高圧下でのミクロ爆発の存在が首肯される。

これに対し, 沸点が水の沸点に近い燃料をベース燃料として使用した場合には, 拡散モデルが有効であると考えられ, ミクロ爆発は殆ど起こらないか, あるいは起こっても非常に微弱であると予想される。

3.5 燃料液滴温度の変化 著者らは, 以前に熱電対(素線径 $76 \mu\text{m}$ の白金・白金ロジウム)先端に燃料液滴を吊し発火までの乳化燃料及びA重油の液滴温度

図7 高圧下の乳化燃料液滴のミクロ爆発の可視化結果

を測定し、乳化燃料液滴内部の水滴の気化開始により、温度履歴上に変曲点が現れることを報告した¹²⁾。ここでは、これと同じ方法により実験を行い変曲点の温度を気化時の液滴温度とし、この温度に及ぼす圧力の影響を調べる。図8にA重油の発火時の液滴温度(T_i)、と乳化燃料中の水滴中の気化時の液滴温度(T_e)の測定結果とこの時の炉内圧力の関係を示す。なお、同図には炉内圧力に対応する水の沸点の値(T_b)が実線で示してある。また、既報のように乳化燃料では、水滴の気化は発火より早いため、発火・燃焼による影響は少ない¹²⁾。

前述のように、均質な気泡核の発生の理論的過熱限界値は、圧力が水の臨界圧力よりかなり低い範囲では、270℃であると言われている⁴⁾。図8によると、A重油の発火時の液滴温度(図中の点線)はこの値を超えており、また、高圧下で発火時の液滴温度は、乳化燃料液滴内部の水滴気化開始温度と大幅には変わらないと言う著者の実験結果¹²⁾と合わせて考えると、この点からも気泡核の発生の可能性を示しているといえる。また、A重油の発火時の液滴温度の変化傾向からみると、さらに圧力が高くなると、この温度は上昇する傾向が見られる。

図8 液滴の発火時と水滴の気化開始時の液滴温度に及ぼす炉内圧力の影響
(d_0 :加熱開始時の液滴直径)

水滴気化時の乳化燃料液滴の温度は、炉内圧力が上昇すると上昇し、その傾向は圧力による水の沸点の変化とはほぼ同じ傾向を示すが、その値は水の沸点より高くなっている。炉内圧力が高くなると、乳化燃料液滴内部の水滴気化時の温度と水の沸点の差は、やや小さくなるが、炉内圧力が2 MPaを超えると、圧力の影響は少なくなる。また、前述のように、気泡成長率は、液滴の温度と水の沸点の差に比例することから、図8に示したように3 MPaより高い圧力でもその差はなお存在し、マイクロ爆発の可能性が十分あると考えられる。

4. 結 論

高圧下の静止単一乳化燃料液滴のマイクロ爆発についての研究を要約すると、次の通りである。

1. 高圧下(3 MPa)においても、A重油をベース油とした乳化燃料液滴のマイクロ爆発が確認された。また、A重油液滴の発火時及び乳化燃料液滴内部の水滴の気化時の液滴温度の変化の傾向から考えると、更に圧力が高くなっても乳化燃料液滴のマイクロ爆発が可能である。

2. 計算による R/R_a の変化と軽油液滴内部の微小水滴による気泡の観察実験によると、圧力が高くなると気泡の成長は遅くなるとともに、気泡の発生時期が早くなる。しかし、少なくとも3.3 MPaまでは気泡の発生を阻む圧力の影響は認められなかった。

終わりに、本論文をまとめるに当たり、種々有益な討論、助言を頂いた東京工業大学神本武征教授、三菱重工業長崎研究所中川洋技師および日本大学森谷信次講師に感謝する次第である。

記 号

- c : 比熱
- L : 水の気化潜熱
- P : 気泡内部の蒸気圧力
- P_{sat} : 蒸気の飽和圧力
- P_{∞} : 燃料液滴周囲の圧力
- R : 気泡半径
- R_a : 常圧下の気泡半径
- R_c : $d(P-P_{\infty})/dR=0$ における臨界気泡半径
- R_d : 燃料液滴半径
- R_0 : 初期気泡半径
- T_b : 水の沸点
- T_m : 気泡周囲燃料の温度
- T_{sat} : 蒸気の飽和温度
- α : 温度伝導率 $=\lambda/\rho_m \cdot c$
- λ : 熱伝導率
- ρ_e : 気泡中蒸気の密度
- ρ_m : 燃料の密度
- σ : 表面張力
- τ : 時間

文 献

- 1) Law, C.K. et al., Combust. & Flame, 37 (1980), 125.
- 2) Yap, L.T. et al., Combust. Sci. & Tech., 41 (1984), 291.
- 3) 中川, ほか1名, 機学誌, 81-720 (1978-11), 1201.
- 4) Law, C.K., Combust. Sci. & Tech., 17 (1977), 29.
- 5) Gollahalli, S.R. et al., 18th Symp. (Int.) on Combust., (1981), 349.
- 6) Wang, C.H. et al., Combust. & Flame, 59 (1985), 53.

- 7) 山崎, キャピテーション工学, (昭53), 1, 日刊工業新聞社.
- 8) Lasheras, J.C. et al., 20th Symp. (Int.) on Combust., 1984, 1761.
- 9) Kenning, D.B.R., Two-phase flow and heat transfer, (1977), 149, Oxford University Press.
- 10) Rayleigh, L., Phil. Mag., 34 (1917), 94.
- 11) Plesset, M.S. et al., J. App. Phys., 25-4 (1954), 493.
- 12) 張, ほか2名, 舶機誌, 23-3 (1988-3), 22

〔質 疑 応 答〕

質問者 東京工大・工 神本武征

〔質問〕 2の理論的検討についてお伺いします。

1. 気泡の生成率の定義が示されていませんが $dR/d\tau$ のことですか。

2. 図2のたて軸は R/R_* ではなく $\dot{R}/\dot{R}_*$ (ただし・は時間微分) とした方が良いではありませんか。

3. 式(2)の L や λ は圧力と温度の関数ですがどのような式を用いられたのでしょうか。

4. 慣性モデルと拡散モデルは各々仮定と適用条件があると思われます。実験結果によると、慣性モデルによる予測の方が本実験の場合には良いように思われますがなぜでしょうか。逆に拡散モデルの予測が不適切な理由もお教え下さい。

3の実験について

実験における滴径は $500 \mu\text{m}$ です。噴霧内の滴径は一桁小さいと思いますが、マイクロ爆発に及ぼす滴径の影響はないのでしょうか。

〔回答〕 2の理論的検討について

1. お説の通り、成長率の定義は $dR/d\tau$ です。

2. 御指摘の通りです。しかし、 $\dot{R}/\dot{R}_*$ は液滴温度上昇率等に影響されるので、その取扱いの複雑さを考えると、マイクロ爆発の強弱に及ぼす影響を定性的にみるには図2に示したような R/R_* と P_∞ の関係で十分であると考えます。

3. L の変化については、蒸気表を使用しました。また、 λ については、一定としました。

4. まとめの(2)でも述べた通り、本実験の範囲内では、圧力の影響は少なく、慣性モデルの方がよく合うと考えます。

その理由として、図1(b)の模式図にも示したように、拡散モデルは液滴内の気泡は表面張力によりその形を保っていると考えたモデルで、従って、ベース燃料の沸点が水の沸点に近い場合には、有効なモデルであります。しかし、本実験のようにベース燃料と水の沸点が相当異なり、液滴が加熱されたとき、両者の温度差が大きい場合には図1(a)の模式図に示したように、気泡内圧力として液温に対する飽和蒸気圧を考えた慣性モデルの方が現象をよりよく表しているためと考えます。

3の実験について

実験条件の制限により、噴霧内の滴径までの実験はできなかったが、本実験では $290 \mu\text{m}$ から $1200 \mu\text{m}$ までの範囲でマイクロ爆発に及ぼす滴径の影響を調べました。この結果、 $290 \mu\text{m}$ の滴径においてもマイクロ爆発が観察され、また、爆発の時期は滴径が小さいほど早くなります。

質問者 三菱重工 中川 洋

〔質問〕 質問者らは⁽¹⁾ディーゼルエンジンの燃焼室内部で生じるような高温高圧下での油中水滴型乳化油のマイクロ爆発は期待できないことを示した。即ち、燃料油自体の臨界点を越えると燃料油の着火以前に燃料油中の水と共に気体となってマイクロ爆発はみられない。

本論文で取扱われている高圧下とは、どのような温度圧力の範囲を指しておられるのか、どのような機器への乳化油の使用を想定しておられるのか。又、本論文で得られている結論はどのような範囲まで成立するのかお教え願いたい。

さらに、燃料油自体の臨界点(例えば、Gas Oil $P_c = 23.7 \text{ kg/cm}^2$, $T_c = 480^\circ\text{C}$)を越える圧力、温度でのマイクロ爆発の存在についての見解をお聞かせ願いたい。

参考

- (1) 中川・立石、「乳化燃料のディーゼル機関における燃焼」 日本機械学会誌, 第81巻 第720号 1201 ~ 1207

〔回答〕 本研究は、乳化燃料液滴のマイクロ爆発に及ぼす圧力の影響を調査することを目的として行った基礎研究で、実験に際しては図3に示したような実験炉を用いたので、燃料液滴の加熱開始から発火までに約3秒を要した。実験条件は図4の実験炉の温度・圧力特性図に示した通りである。従って、図4からわかるように、実験炉内圧力は加熱開始時の圧力 $P_0 = 2.1 \text{ MPa}$ の場合、発火時にはディーゼル機関燃料噴射時のシリンダー内圧力にはほぼ等しい 3 MPa 程度まで上昇する。

燃料の臨界点における物性値は燃料によって様々であるが、実験ではA重油を乳化燃料のベース燃料として用いた場合、同じ炉内圧力でも炉内の温度上昇の速いとき即ち、液滴の温度上昇の速いとき、マイクロ爆発の時期が早くなり、また爆発も強くなることが観察された。なお、このような加熱方法ではマイクロ爆発開始時の燃料液滴温度は燃料自体の臨界点温度より低いと考える。

質問者 日本大学工学部 森谷信次

〔質問〕

1. 界面活性剤を添加してエマルジョン燃料を作っているようですが、時間経過による分離状況の有無はいかがですか。

2. 図8において液滴爆発時の温度が出ておりますが、炉内と液滴爆発時の温度差があると思われますがいかがですか。

3. 液滴爆発に使用した白金・白金ロジウム熱電対の応答時間はどの位ですか。

〔回答〕 1. 界面活性剤を添加した乳化燃料の分離状

況は水添加率にもよるが、本実験では、水添加率40 vol. %の場合、試験管での観察によれば一昼夜ぐらいまで分離が認められず、安定しています。

2. その通りです。温度差があります。またこれについては、既報⁽²⁾の図10に炉内温度と液滴温度の履歴を

示しました。

3. 応答時間は計測していないが、既報⁽²⁾の図12に示したように、本実験では液滴温度の上昇はあまり速くないため、熱電対の応答時間による差は少ないと考えています。