

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：53203

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18320

研究課題名（和文）エマルション液滴のマイクロ爆発発生メカニズムおよび液滴飛散挙動に関する検討

研究課題名（英文）Study on micro-explosion mechanism and droplet scattering behavior of emulsion droplet

研究代表者

山田 圭祐（Yamada, Keisuke）

富山高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：40707949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、船用大型ディーゼルエンジンなどの燃料として使用できるエマルション燃料に着目し、燃料の調整条件が液滴加熱時に発生するマイクロ爆発に及ぼす影響を明らかにすることが目的である。ベース燃料には、重油や軽油に相当する複数の直鎖炭化水素燃料を採用した。含水率や界面活性剤濃度、分散水滴の粒度分布を変化させ、高温壁面上で球状蒸発する直径1～2 mmのエマルション液滴の内部挙動およびマイクロ爆発挙動の詳細な観察を行った。ベース燃料の沸点がマイクロ爆発挙動に大きく影響すること、分散水滴粒度分布が分散水滴の凝集過程やマイクロ爆発挙動にも影響することなど、幅広い実験条件で体系的に調査し明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エマルション燃料は水分を含ませても燃焼性を損なうことなく、NOxやPMといった環境負荷物質を低減でき、特に重油など低質油を使用する場面での実用が期待される。燃焼効率を上げるためにはマイクロ爆発を促進することが重要であるが、エマルションの運用の観点から乳化安定性も求められる。分散水滴の粒度分布は乳化安定性を左右するとともにマイクロ爆発挙動にも影響を及ぼし、共に望ましい状況を同時に実現することが難しい場合も存在し、加熱時の液滴温度が影響していることなどが明らかになった。本研究で得られた知見は、エマルションの燃料設計を行う際の指針として活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the effect of emulsion preparation conditions used as fuel for marine diesel engines on micro-explosion of droplets. As a base fuel, several linear hydrocarbon fuels equivalent to heavy oil and light oil were adopted. By changing the water content, surfactant concentration, and particle size distribution of dispersed water droplets, we observed in detail the internal behavior and micro-explosion behavior of emulsion droplets with a diameter of 1 to 2 mm that evaporate spherically on a hot surface. It was systematically clarified under a wide range of experimental conditions that the boiling point of the base fuel greatly affects the micro-explosion behavior, and that the particle size distribution of the dispersed water droplets also affects the aggregation process and the micro-explosion behavior.

研究分野： 燃焼工学

キーワード： エマルション燃料 油中水滴型 ミクロ爆発 多分散エマルション 単分散エマルション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

エマルジョン燃料は、重油や軽油などの燃料油に少量の界面活性剤を添加して水乳化させたものを指す。加熱時あるいは燃焼時の特徴として、エマルジョン中に含まれる水分の潜熱により燃焼温度が低下することや、水分の突沸によりエマルジョン液滴のマイクロ爆発が発生することが古くから知られている。これらのことから、燃料に水を含ませることによる燃焼性の低下を抑えつつ、窒素酸化物や粒子状物質の排出を低減する効果があり、低質油を用いる燃焼機器、例えば船用ディーゼルエンジンやボイラなどでの利用例がある。

エマルジョン燃料による基礎研究として、単一液滴の蒸発、着火、燃焼、また容器中における燃料噴霧の性状や着火、燃焼、さらには実機での性能試験や排ガス性状に着目するものなど多岐に渡る。単一液滴を対象とする研究はこれまでに多くあり、高温壁面上で球状蒸発する液滴、石英細線や熱電対に懸垂した液滴を対象として調査が行われ、知見が得られている。本研究代表者は、高温壁面上にエマルジョンを滴下し、球状蒸発する液滴の挙動を詳細に観察する実験を行ってきた。直鎖炭化水素燃料の *n*-ドデカン をベースとする油中水滴 (W/O) 型エマルジョンおよび水中油滴 (O/W) 型エマルジョンを対象に液滴挙動の比較を行い、エマルジョン中の水分の相分離過程、さらにはディスラプション (強いマイクロ爆発) やパフィン (弱いマイクロ爆発) の発生のタイミングや頻度、液滴温度など、乳化タイプの違いが一連の現象に大きな差異をもたらすことを体系的に明らかにした。

しかしながら、これまでベース燃料として扱っていた *n*-ドデカンは、比較的軽質な燃料油に相当する。実際には重油や軽油でエマルジョン化が行われることを考慮すると、さらに沸点の高い直鎖炭化水素燃料についても、一連の現象を確認する必要がある。また、実機に投入されることが多い W/O エマルジョンの場合、燃料油と水の割合が同一であっても、分散水滴の粒度分布が異なると、液滴加熱時において相分離過程に差異が生じ、これがマイクロ爆発挙動にも影響する可能性が考えられていたことから、これらの検証を行う必要があった。

## 2. 研究の目的

上述のとおり、エマルジョン液滴を加熱あるいは燃焼した際のマイクロ爆発については、かねてより様々な研究が行われ、知見が得られている。しかしながら、W/O エマルジョンは O/W エマルジョンに比べて、液滴加熱時の分散水滴の凝集が緩やかに進行するため、エマルジョンの作成条件や加熱条件によっては分裂の発生頻度が著しく低下するなど、全容を把握することが困難であった。本研究では、ベース燃料とする直鎖炭化水素燃料の炭素数や含水率、分散水滴の粒度分布などを変化させ、エマルジョン加熱時の液滴内部挙動の観察や液滴温度の計測、マイクロ爆発挙動の観察および統計評価により、一連の現象を体系的に明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

(1) エマルジョンの作成は、基本的にはマグネティックスターを用いる攪拌法により行った。また、分散水滴の粒度分布による現象の比較を行う場合には、粒度分布の制御を行うことができる膜乳化法も用いた。

本研究では、エマルジョンのベース燃料として *n*-ドデカン ( $C_{12}H_{26}$ )、*n*-テトラデカン ( $C_{14}H_{30}$ )、*n*-ヘキサデカン ( $C_{16}H_{34}$ ) を採用した。含水率はエマルジョンに対して 10～40 vol. % とした。界面活性剤はソルビタンモノオレエート (HLB 値 4.3) を用い、原則 1 vol. % としたが、その濃度の影響を調べる場合には 0.2～1.0 vol. % とした。エマルジョンの作成に際しては、まず所定量のベース燃料と界面活性剤をサンプル瓶に取り、これを低速で攪拌する。次に、規定量の水を入れ、その後は 900 rpm で 12 時間攪拌する。最後にサンプル瓶をデシケータに入れてエマルジョンの脱気処理を行い、試料を用意した。攪拌法で得たエマルジョンは、大小様々な水滴が分散しており、顕微鏡を介して撮影し粒度分布の解析を行った。

本研究の後半では、エマルジョンの微視的構造に着目し、乳化の安定性によるエマルジョン液滴の内部挙動やマイクロ爆発挙動の比較を行うことを目的とした。そこで、多孔質膜を用いる膜乳化法により、エマルジョンを作成した。図 1 に、膜乳化法の概略を示す。ベース燃料と界面活性剤の混合液をビーカーに入れ、この中に円筒形多孔質膜を浸す。多孔質膜の内側は水で満たされており、窒素加圧により水滴を多孔質膜から押し出して混合液中に送り込む。この間、混合液はスターにより低速で攪拌されており、混合液に送り込まれる水滴のサイズは均一となり、単分散エマルジョンが得られる。多孔質膜の孔径や窒素圧力などにより、分散水滴径の制御が可能となる。膜乳化法により作成したエマルジョンについても、顕微鏡写真をもとに粒度分布解析を行ったところ、攪拌法のエマルジョンに比べて、高い単分散性が得られていることを確認した。

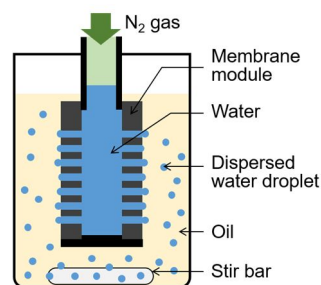


図 1 膜乳化法の概略

(2) 図 2 に、液滴の加熱を行うための実験装置を示す。エマルションの加熱を行う壁面は凹形状になっている。ある温度を超えるとライデンフロスト現象が起き、エマルションは球形を保ちながら現象が進行していくため、液滴内部挙動も詳細な観察が可能となる。高温壁面は中心軸上の 3 点に熱電対が挿入されており、外挿法により壁面温度を推定する。温度制御は壁面下部にあるカンタル線ヒータへの印加電圧の調整により行った。本研究では、壁面温度を 600～700 K とした。マイクロシリンジを用いて壁面上に滴下したエマルションの挙動は、斜め上方に設置したデジタルカメラにより動画 (60 fps) で記録を行った。また、エマルション液滴の分裂により二次液滴が飛散する様子は、ハイスピードカメラにより撮影 (16,000 fps) した。また液滴温度については、壁面上にエマルションを滴下した後、直ちに K 型熱電対 (素線径 25  $\mu\text{m}$ ) の测温接点を液滴に挿入し、データロガー (サンプリング周波数 100 Hz) に記録した。

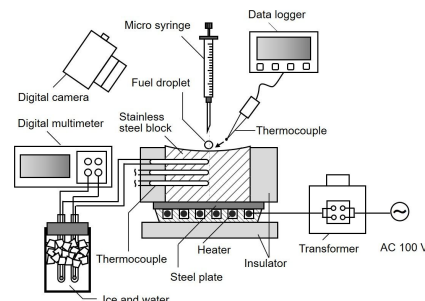


図 2 実験装置

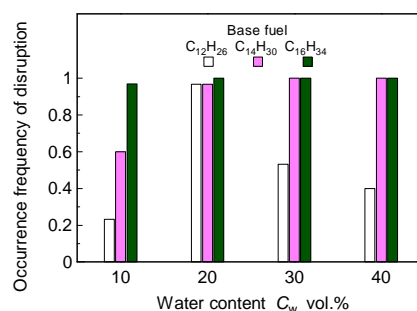


図 3 分裂の発生頻度

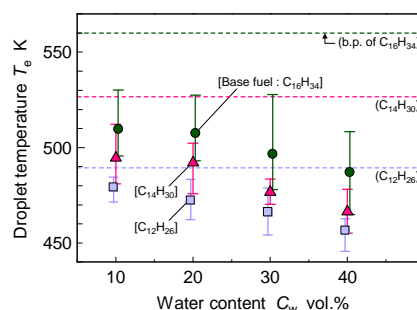


図 4 分裂発生時の液滴温度

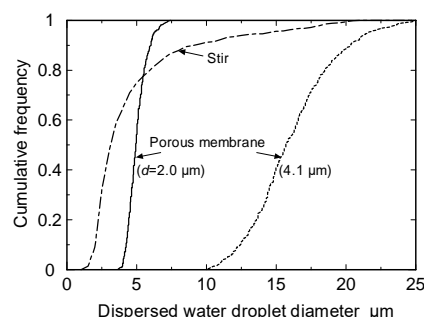


図 5 分散水滴の粒度分布

(2) エマルションを燃料として利用する際、乳化の安定性が重要になる。W/O エマルションの場合、分散水滴をより小さくすることや粒径を均一に揃えることで乳化の安定性を向上でき、作成後の保管の観点などから有利になると考えられている。しかし、乳化が安定すると、加熱時の分散水滴の凝集の進行が遅くなり、マイクロ爆発の発生を抑制する作用が現れることも考えられた。そこで、攪拌法により作成した多分散エマルションと、膜乳化法により作成した単分散エマルションを対象とし、壁面上で加熱した際の液滴内部挙動およびマイクロ爆発挙動の比較を行った。この実験では、ドデカンとヘキサデカンの 2 種類をベース燃料とし、含水率は 20 vol. % に揃えた。また、膜乳化の条件を検討し、ザウター平均粒径が多分散と単分散のエマルションで同程度となるように調整を行った。

図 5 に、分散水滴粒度分布の比較例として、ベース燃料をヘキサデカンとしたときの多分散エマルションおよび単分散エマルションのデータを示す。多孔質膜の孔径は 2.0, 4.1  $\mu\text{m}$  である。膜乳化法で作成したエマルションの分散係数は攪拌法の場合より小さく、粒径の均一性が一定程度保たれていることを確認した。ドデカンをベース燃料としたときも、粒度分布の傾向については同様であった。

図 6 に、ベース燃料および乳化方法による分裂発生頻度への影響を示す。ベース燃料はドデカンとヘキサデカンであり、ともに多分散エマルションと、粒径の大小が異なる単分散エマルションの結果である。ドデカンをベースとするエマルションでは、孔径の小さい多孔質膜を用いて作成した場合、他の条件よりも乳化の安定性が高かった。このため、液滴加熱時においては分散



水滴の凝集が遅く、分裂が発生することなく液滴が蒸発し消失するケースが多く確認された。一方、孔径が大きい多孔質膜を用いた場合は前者よりも高い頻度で分裂が発生するものの、多分散エマルジョンより低くなった。これらのエマルジョンはベース燃料と水の混合割合が同一であり、分散水滴の粒度分布のみが異なる。この結果から、粒度分布がエマルジョン加熱時の分散水滴の凝集過程に差異を生じ、さらにその後の分裂挙動も大きく異なることが示された。一方、ヘキサデカンベース燃料とするエマルジョンでも同様の比較を行ったところ、いずれの作成条件においても分裂は確実に発生した。

図7に、ヘキサデカンベース燃料とする3種類のエマルジョンの分裂発生時期（分裂発生待ち時間）の累積頻度を示す。乳化方法による若干の差異は見られるが、いずれも分裂発生時期は約2~4秒の範囲内に分布している。

以上のことから、比較的沸点の低い成分をベースとするエマルジョンは、液滴の温度上昇による分裂発生率の増大よりも、分散水滴の均一化によりミクロ爆発の発生が抑制される効果の方が現れている可能性が示された。つまり、分散水滴の制御による乳化安定性の向上を図ると、エマルジョンの特徴であるミクロ爆発の効果が減少することを指す。一方、比較的沸点の高い成分をベースとするエマルジョンは、膜乳化法により乳化状態が安定したものであっても、高い頻度で分裂が発生することから、液滴温度の上昇による分裂発生の促進効果の方が現れていると考えられる。実際の燃焼機器でエマルジョン化する燃料は、重油のように沸点の高い成分を中心に構成されており、分散水滴が均一で小さい、つまり乳化の安定性が高いものであっても、ミクロ爆発発生の観点からはその影響が小さい可能性が示された。

(3) エマルジョン液滴の分裂は、発生するまでの待ち時間が数秒間あるのに対し、現象自体は瞬間的である。二次液滴の飛散速度は、実機の燃焼場においても燃料と空気の混合促進の観点から重要な指標になると考えられる。液滴の分裂による二次液滴飛散速度の計測に際しては、エマルジョンの含水率を20 vol. %に揃え、3種類のベース燃料でそれぞれ攪拌法により作成したエマルジョンを対象とした。図8は高速度カメラで撮影した動画から連続画像(1280×116 pix, 空間分解能23 μm)を得て、分裂の発生直前から1コマずつ並べたものである。飛散する二次液滴または蒸気の前縁位置は、画像の二値化により検出した。分裂発生直後の数コマに写されたものは微小な二次液滴が主であると仮定し、その飛散速度は分裂直後のコマとその1つ後のコマの前縁移動距離をもとに推算した。

図9は、ベース燃料ごとに分裂の発生時期と飛散速度をまとめたものである。ドデカンベース燃料とするエマルジョンでは、時間の経過とともに飛散速度は低下している傾向が見られた。一方、テトラデカンおよびヘキサデカンベース燃料とするエマルジョンでは、時間の経過とともに飛散速度が増大する傾向が見られた。ドデカンの場合には、低沸点であることと分裂の発生時期が比較的遅いことから、液滴温度が沸点近くまで上昇し概ね一定になっている。一方、テトラデカンやヘキサデカンベース燃料とするエマルジョンの分裂発生時期は比較的早く、温度上昇過程にあることが液滴温度履歴から確認されている。このことが、時間の経過とともに飛散速度が増大したことに関係していると考えられる。また二次液滴の飛散速度は遅いときでも約10 m/s、速いときでは70 m/sを超えるケースもあり、エマルジョン液滴の分裂が噴霧燃焼場において燃料と空気の混合促進効果を持つ可能性を示すものである。また、分裂発生前における気泡核の生成など、液滴内部で急速に進行する現象については、本研究の高速度撮影では捉えることができなかった。しかしながら、これらはエマルジョン液滴の分裂の起点となる部分であり、今後メカニズムを詳細に解明することで、エマルジョン燃焼法の有効な利用に寄与できるものとする。

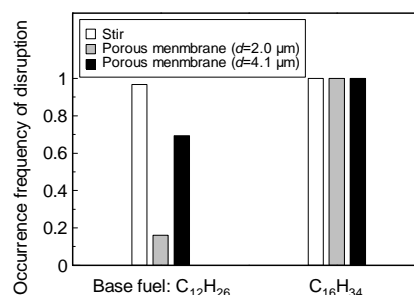


図6 分裂発生頻度の比較

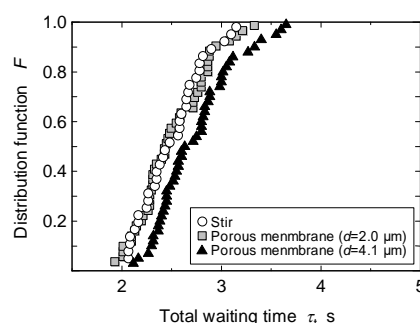


図7 多分散エマルジョンと単分散エマルジョンの分裂発生時期

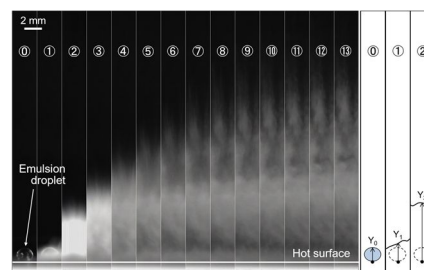


図8 分裂による二次液滴飛散挙動および前縁位置計測の概要

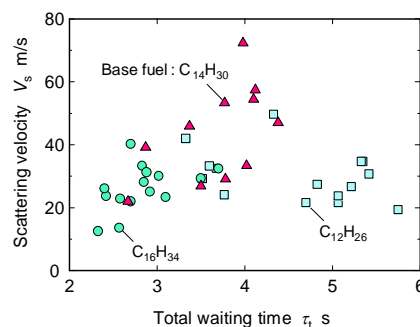


図9 二次液滴の飛散速度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>山田圭祐, 片岡秀文, 瀬川大資                                 | 4. 巻<br>60              |
| 2. 論文標題<br>高温壁面上におけるW/Oエマルション液滴の内部挙動および微粒化挙動に及ぼす界面活性剤濃度の影響 | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>日本燃焼学会誌  | 6. 最初と最後の頁<br>278 ~ 285 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                              | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）                      | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>岡本凌河, 山田圭祐                       |
| 2. 発表標題<br>W/Oエマルション液滴のマイクロ爆発挙動に及ぼす分散水滴径の影響 |
| 3. 学会等名<br>第26回高専シンポジウムオンライン                |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山田圭祐, 片岡秀文, 瀬川大資                          |
| 2. 発表標題<br>W/Oエマルション液滴のマイクロ爆発による二次液滴飛散挙動に及ぼすベース燃料の影響 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会熱工学コンファレンス2018                      |
| 4. 発表年<br>2018年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山田圭祐, 片岡秀文, 瀬川大資                      |
| 2. 発表標題<br>高温壁面上におけるW/Oエマルション液滴のマイクロ爆発に及ぼす含水率の影響 |
| 3. 学会等名<br>第55回燃焼シンポジウム                          |
| 4. 発表年<br>2017年                                  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|