

称号及び氏名 博士（工学） 山田 圭祐

学位授与の日付 2015年 9月 25日

論文名 「エマルション液滴のマイクロ爆発および液滴列の燃拡がりに関する研究」

論文審査委員  
主査 瀬川 大資  
副査 須賀 一彦  
副査 高比良 裕之

## 論文要旨

エマルション燃焼法とは、文字どおりエマルションを燃焼させる手法であり、液体燃料と水をエマルションとする。液体燃料に水を加えると、水の顕熱と潜熱により燃焼温度が低下することから、燃焼による窒素酸化物排出の低減が期待される。液体燃料として利用される石油系燃料の多くは水と混和しないことから、少量の界面活性剤を用いてエマルションとすることで、液体燃料に水が加えられる。最も単純な内部構造のエマルションは、連続相と分散相で構成され、分散相が燃料となる水中油滴型エマルション（O/W エマルション）と、分散相が水となる油中水滴型エマルション（W/O エマルション）に分類される。W/O エマルションでは、低沸点の水が液体燃料に内包されることから、エマルションの燃焼過程で水が過熱され、それが突沸（マイクロ爆発）することで、液体燃料が微細化され、燃焼場で適度に分散すること（二次微粒化）が期待される。前述のとおり燃焼温度が低下すると窒素酸化物は低減されるが、一般には燃焼が不安定化する。しかしながら、二次微粒化の効果が加わることで、安定な燃焼を維持しつつ窒素酸化物が低減される可能性がある。

このような背景から、W/O エマルションの燃焼に関する実験研究が、これまで数多く行われてきている。液体燃料の一般的な燃焼形態である噴霧燃焼の実験では、窒素酸化物の排出低減効果が確認されている。しかしながら、小規模なマイクロ爆発の発生は確認されているが、大規模な

マイクロ爆発による二次微粒化については、期待に反して、高い頻度での発生は確認されていない。一方、O/W エマルションでは、水が連続相であるにもかかわらず、非常に高い頻度での二次微粒化の発生が、単一液滴の蒸発および燃焼の実験において確認されている。O/W エマルションと W/O エマルションとを比較した実験研究は、これまでいくつか行われているが、それらのマイクロ爆発挙動がどのように異なるのかについては、十分な情報は公開されていない。さらに、噴霧燃焼においては、その構成要素である燃料液滴が、相互に干渉しながら蒸発、燃焼するが、エマルションの場合にそのような相互干渉が蒸発、燃焼にどのように影響するのかについては、公開された情報は見当たらない。エマルション燃焼法の普及にあたっては、さらに詳細な知見の蓄積をもとに、燃焼に適したエマルションを選定することが重要である。

本研究は、単一液滴として蒸発するときのマイクロ爆発挙動、および液滴列において相互に干渉しながら蒸発、燃焼する典型例である、液滴列の燃拡がり挙動が、O/W エマルションと W/O エマルションでどのように異なるのかについて、実験により明らかにするとともに、マイクロ爆発挙動の違いが燃拡がり挙動にどの程度影響するのかについて、知見を得ることを目的としている。単一液滴として蒸発するときのマイクロ爆発挙動については、高温壁面上で液滴を球状蒸発させて、その挙動を観察するとともに、マイクロ爆発発生までの遅れ時間（待ち時間）を統計分析することで、O/W エマルションと W/O エマルションのマイクロ爆発挙動の違いを検討する。液滴寸法のマイクロ爆発挙動への影響についても、併せて検討する。液滴列の燃拡がり挙動については、液滴寸法や液滴間隔など、幅広い実験条件が想定されることから、比較的その実施が容易な通常重力下での実験により、O/W エマルションと W/O エマルションの燃拡がり挙動の違いについて、およそその傾向を明らかにする。そして、その結果を参照しながら、自然対流の影響が大幅に低減される微小重力実験を実施して、O/W エマルションと W/O エマルションの燃拡がり挙動の基本的な違いを検討する。最後に、以上の結果を相互に比較検討して、エマルション燃焼法の普及に資する知見としてまとめる。

本論文は、6つの章から構成される。

第1章は序論であり、エマルション燃焼法に関する研究の背景と、エマルションの蒸発および燃焼に関するこれまでの研究について俯瞰するとともに、噴霧燃焼機構の解明のために行われている純燃料の液滴燃焼研究についても俯瞰した。そして、その結果浮上した課題、本研究の目的について述べている。

第2章では、第3章以降で試料とするエマルションの、微視的構造に着目した。光学顕微鏡により微視的構造の観察を行い、画像解析により分散相の粒度分布と分散係数を求めた。その結果をもとに、O/W と W/O との違いや含水率が微視的構造にどのように影響しているのかについて、

述べている。

第3章では、高温壁面上で球状蒸発するエマルション液滴の、内部挙動とマイクロ爆発挙動の詳細な観察を行った、そして、二次微粒化に相当するような、エマルション液滴が消失する大規模なマイクロ爆発を分裂と称し、エマルション液滴がほぼ残存する小規模なマイクロ爆発であるパフィンングと区別した。そして、分裂発生までの待ち時間の統計解析を行った。O/W エマルション液滴ではすべての場合に、高温壁面への滴下直後に液滴内で水分が凝集、合一して、それが燃料成分に覆われる、相分離が観察された。そしてその後、水分の過熱、突沸により、分裂が発生した。一方、W/O エマルション液滴では、その消失までパフィンングが断続的に発生する場合と、数回のパフィンングの後に分裂が発生する場合とがあった。壁面温度が低いと相分離が進まず、パフィンングが断続的に発生する頻度が高くなり、壁面温度が高いと相分離して、分裂が発生する頻度が高くなった。W/O エマルションは温度上昇に対して比較的安定なことから、相分離までに O/W エマルションよりも長い時間を要していたと推定された。そしてそれに対応するように、W/O エマルションでは分裂発生までの待ち時間が長くなった。以上の結果より、液滴内での相分離により、大規模なマイクロ爆発である分裂が発生すると結論付けた。

さらに、高温壁面上で球状蒸発するエマルション液滴の温度測定を試み、分裂発生待ち時間の統計解析との比較検討を行った。その結果、O/W エマルションでは早期の、液滴温度の上昇期間に分裂が発生するのに対し、W/O エマルションでは中期以降の、液滴温度上昇の緩和期間に分裂が発生すること、そして W/O エマルションではその待ち時間に、水分が減少していることが推定された。また、パフィンングの発生は液滴温度の上昇を抑制し、それにより分裂の発生を妨げていることが推定された。

第4章では、小型風洞内に等間隔に直列配置した石英線の先端にエマルションを懸垂してエマルション液滴列を形成し、微速空気流中において火炎が燃広がる様子を通常重力下で観察した。エマルションの種類、液滴間隔、強制空気流速を実験パラメータとし、エマルション液滴列の燃広がるの概要を検討した。純燃料の液滴列では2種類の燃広がる挙動、未燃液滴が燃広がる火炎内に取込まれて火炎内で加熱され、十分に蒸発が進行することで燃焼を開始して燃広がるモード1と、未燃液滴が燃広がる火炎から離れた位置で加熱されて蒸発が進行し、形成された可燃混合気層が燃広がる火炎とともに拡大して接することで燃焼を開始して燃広がるモード2が観測されているが、エマルション液滴列でも同様な燃広がる挙動が確認された。液滴間隔が小さい場合、強制空気流速が大きい場合に、モード1となった。そして、この燃広がる挙動が遷移する液滴間隔付近で、燃広がる速度は極大を示した。強制空気流が燃広がると同方向の場合には、W/O エマルションの方が燃広がる速度は高くなったが、強制空気流を加えない場合や強制

空気流が燃拡がりとは逆方向の場合は、O/W エマルションの方が燃拡がり速度は高くなった。含水率が高くなると燃拡がり速度は低下したが、その燃拡がり速度の純燃料の場合に対する低下割合は、含水率と同程度であり、液滴間隔による違いは見られなかった。

第5章では、落下塔で実現される短時間の微小重力環境で、エマルション液滴列の燃拡がり実験を行った。第4章で確認された2種類の燃拡がり挙動は、微小重力環境でも同様に観察された。また、液滴間隔が大きくなり燃拡がり限界を超える以外に、O/W エマルションでは分裂により燃拡がり火炎が飛散、消失して、燃拡がりが停滞する現象が観察された。また一方で、分裂により飛散した微細な燃焼液滴が着火源となって、燃拡がりが促進される現象も観察された。これらのことから、早期に分裂するようなエマルションを噴霧燃焼に対して最適化することで、安定燃焼が実現される可能性のあることが示唆された。燃焼場での燃拡がり方向は三次元であることから、エマルション液滴の分裂による燃拡がり促進は、十分に期待される。

燃拡がり速度については、純燃料の液滴列燃拡がり研究で用いられている無次元液滴間隔と正規化燃拡がり速度を用い、諸因子の影響について検討した。初期液滴直径を乗じて正規化した燃拡がり速度はある無次元液滴間隔で極大を示し、その無次元液滴間隔は燃拡がり挙動が遷移するときの無次元液滴間隔と同程度であった。また、含水率が低い場合には O/W エマルションの方が燃拡がり速度は高くなり、含水率が高い場合には W/O エマルションの方が燃拡がり速度は高くなった。モード2の燃拡がりが観察された条件において、燃拡がり直前の火炎前縁位置と液滴位置との関係を検討したところ、O/W と W/O との違いや含水率の影響は見られなかった。このことから、O/W エマルションと W/O エマルションでは燃拡がり火炎が十分に拡大するまでの時間が異なることにより、燃拡がり速度が異なると推定された。

第6章では、以上の成果を総括して本研究の結論を示し、工学的寄与について言及した。

## 審査結果の要旨

本論文は、液体炭化水素燃料と水とのエマルションのマイクロ爆発および燃焼の基本特性を、水中油滴型エマルション（O/W エマルション）と油中水滴型エマルション（W/O エマルション）とを対比して検討した結果をまとめたものであり、以下の重要な成果を得ている。

- (1) エマルション単滴が高温壁面上で球状蒸発するときの挙動に及ぼす壁面温度および初期液滴直径の影響を検討し、O/W エマルションと W/O エマルションの共通点を明らかにした。相分離して添加水分が燃料に内包され、それが突沸することで、強いマイクロ爆発である分裂が発生

して微粒化されること、初期液滴直径が小さくなるか壁面温度が高くなると、微粒化が早まることを示した。

- (2) 両エマルションのマイクロ爆発挙動の相違点も明らかにした。O/W エマルションでは短時間で相分離して微粒化されるのに対し、W/O エマルションでは相分離に長時間が必要であり、とくに壁面温度が低い場合には、弱いマイクロ爆発であるパフィンク（部分的な微粒化）を繰り返して、微粒化が進まないまま消失することを示した。
- (3) エマルション液滴列の燃拡がり挙動に及ぼす液滴間隔などの影響を検討し、O/W エマルションと W/O エマルションの共通点を明らかにした。純燃料で見られる二種類の燃拡がり挙動が同様に観察されることを示し、その燃拡がり挙動が遷移する液滴間隔付近において、燃拡がり速度が極大となることを示した。また、水添加による燃拡がり速度の低下割合が、含水率と同程度であることを示した。
- (4) 両エマルションの燃拡がり挙動の相違点も明らかにした。燃拡がり速度は、含水率が低い場合には O/W エマルションの方が高くなり、含水率が高い場合には W/O エマルションの方が高くなることを示し、燃拡がり火炎が十分に拡大するまでの時間が両エマルションで異なることがその主要因と推定した。また、O/W エマルションでは、分裂により飛散した微細な燃焼液滴が着火源となり、燃拡がりが促進される現象が観察され、より早期に分裂する燃料エマルションの開発の必要性が示された。

以上の諸成果は、エマルション燃焼法の普及のための基本的な指針を示すとともに、さらなる展開の可能性を示しており、本分野の学術的・産業的発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うにあたって必要な能力と学識を有していることを証するものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。