

称号及び氏名	博士（工学） 田中 創
学位授与の日付	2007年3月31日
論文名	「乳化燃料液滴の蒸発・燃焼・マイクロ爆発現象に関する研究」
論文審査委員	主査 角田 敏一 副査 須賀 一彦 副査 高比良 裕之

## 論文要旨

乳化燃料は、一般に、石油系燃料をベース燃料として水と少量の界面活性剤を加えて安定化させた非溶解性混合燃料であり、互いに混合しない成分の一方が微粒子となって他方の連続相に分散する構造を持つ。乳化燃料を燃焼させるいわゆる乳化燃焼法は、燃焼特性を改善し、排気浄化に有効であることが実験によって確認されている。乳化燃料が燃焼する際に、乳化燃料中の水が飽和温度の高いベース燃料によって過熱されることにより急激な相変化が生じ、マイクロ爆発と呼ばれる二次微粒化が発生する。この二次微粒化によって、乳化燃料液滴は無数の微細液滴となって飛散し、燃焼用空気との混合が促進されるとともに、接触面積が増大することによって蒸発が促進され、燃焼特性が改善され、かつ未燃炭化水素やすすの生成が抑制される。また、水の蒸発潜熱吸収により火炎温度が低下し、窒素酸化物の生成が抑制される。

乳化燃料の蒸発および燃焼に関する研究は従来より多く行われてきた。これらは、主として実際の燃焼器における燃焼および排気特性を包括的に調べたものや気中における乳化燃料単一液滴の燃焼特性について調べたものである。しかしながら、高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発および燃焼特性ならびに一様空気流中における乳化燃料液滴列に関する研究は少なく、しかも、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やマイクロ爆発発生待ち時間についての統計的な解析ならびに発生機構の検討はなされていない。

本研究では、乳化燃焼法に関する基礎的な知見を得ることを目的として、高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発、燃焼およびマイクロ爆発ならびに一様空気流中における乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動とマイクロ爆発に関する実験を行った。結果の解析からマイクロ爆発発生機構を

統計的見地から解明し、マイクロ爆発発生率に関する実験式を提案するとともに、乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動に関する考察を行った。

マイクロ爆発発生は液相における熱および物質輸送の影響を受けると予想されることから、まず乳化燃料を加熱し、光学顕微鏡を用いて構造変化を調べた。一方、マイクロ爆発発生に関して最弱リンクモデルおよびワイブル分布に基づく確率モデルを用いたデータ処理方法を整理するとともに、均一核生成理論および不均一核生成理論に基づく現象モデルからマイクロ爆発発生率の推定を行い、この確率モデルから導出された特性値を用いて、乳化燃料液滴のマイクロ爆発について統計的性質の検討を行った。ついで、乳化燃料液滴を高温壁面上で球状蒸発および燃焼させ、光学的観察によって液相の挙動を調べるとともにマイクロ爆発発生待ち時間を測定し、その分布に確率モデルを適用して統計的性質ならびにマイクロ爆発発生率に及ぼすベース燃料性状、壁面温度、含水率および雰囲気圧力の影響を明らかにした。液膜蒸発領域にわたる広範囲の壁面温度において寿命曲線を得るとともに、それに及ぼす雰囲気圧力、含水率およびベース燃料性状の影響を明らかにした。また、一様空気流中における乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動を観察するとともに燃え広がり速度を測定し、それに及ぼす周囲空気流速、含水率、ベース燃料性状、液滴間隔、初期直径および乳化燃料性状の影響を明らかにした。そして、乳化燃料液滴列におけるマイクロ爆発発生待ち時間を測定し、その分布に確率モデルを適用して統計的性質を検討するとともに、マイクロ爆発発生率に及ぼす液滴位置、液滴間隔、含水率および周囲空気流速の影響を明らかにした。最後に、現象モデルからの推定に基づき、高温壁面上における実験で得られたマイクロ爆発発生率を乳化燃料液滴温度と乳化燃料液滴内水分量で整理するとともに、通常重力環境下および微小重力環境下で懸垂乳化燃料液滴を燃焼させた場合の実験結果をあわせて検討し、マイクロ爆発発生率に関する実験式を導出した。

本論文は第1～7章で構成され、第1章は序論である。ここでは、乳化燃料の蒸発および燃焼に関する研究、液滴の壁面蒸発および燃焼に関する研究および液滴列の蒸発および燃焼に関する研究を概観した結果とその問題点および本研究の目的について述べている。

第2章では、マイクロ爆発発生が液相における熱および物質輸送の影響を受けると予想されることから、乳化燃料を加熱し、光学顕微鏡を用いて構造変化を調べた。水中油滴形乳化燃料では、温度上昇とともにベース燃料液滴の凝集、転相を経て相分離が生じることを明らかにした。また、油中水滴形乳化燃料では、温度が上昇しても、水滴の凝集は進行せず、転相および相分離が生じないことを明らかにした。

第3章では、マイクロ爆発発生に関して最弱リンクモデルおよびワイブル分布に基づく確率モデルを用いたデータ処理方法を整理するとともに、均一核生成理論および不均一核生成理論に基づ

く現象モデルからマイクロ爆発発生率の推定を行った。確率モデルからマイクロ爆発発生に関する特性値として、マイクロ爆発発生待ち時間の分布関数、マイクロ爆発発生平均待ち時間およびマイクロ爆発発生率の式を導出し、現象モデルに基づいて、マイクロ爆発発生率が乳化燃料液滴温度および乳化燃料液滴内水分量で表すことができると考えた。

第4章では、高温壁面上における乳化燃料液滴のマイクロ爆発と寿命時間について調べた。種々のベース燃料、壁面温度、含水率および雰囲気圧力について、乳化燃料液滴を高温壁面上で球状蒸発および燃焼させて実験を行い、マイクロ爆発発生待ち時間を測定し、その分布に確率モデルを適用して統計的性質を検討した。待ち時間分布は形状母数2である摩耗故障型ワイブル分布で近似できることを示し、ベース燃料の飽和温度、含水率、壁面温度および雰囲気圧力の上昇とともにマイクロ爆発発生待ち時間は短くなり、同一時刻におけるマイクロ爆発発生率は増大することを明らかにした。さらに、光学的観察により高温壁面上で球状蒸発および燃焼する水中油滴形乳化燃料液滴はマイクロ爆発発生以前に相分離することを示した。ついで、液膜蒸発領域にわたる広範囲の壁面温度において乳化燃料液滴の寿命時間を測定した。乳化燃料の寿命曲線には、極小点（最大蒸発率点）および極大点の一つずつ存在することを示した。さらに、乳化燃料は壁面温度の上昇とともに、液膜蒸発、液膜蒸発から沸騰蒸発への移行、液膜蒸発から沸騰蒸発を経て球状蒸発への移行、ならびに球状蒸発、の四つの蒸発形態を示すことを明らかにした。また、雰囲気圧力の上昇とともに寿命曲線は高温側へ移行し、最大蒸発率点および極大点における寿命時間は減少すること、含水率の上昇とともに極大点における寿命時間は増大することおよびベース燃料の飽和温度の上昇とともに寿命曲線は高温側へ移行し、極大点における寿命時間は減少することを明らかにした。

第5章では、乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動とマイクロ爆発について調べた。一様空気流中流れ方向直列に配置された乳化燃料液滴列の燃焼実験を行い、火炎の燃え広がり速度を測定し、それに及ぼす周囲空気流速、含水率、ベース燃料性状、初期直径、液滴間隔および乳化燃料性状の影響を検討した。乳化燃料液滴列の燃え広がり挙動には三つのモードが存在することを示し、周囲空気流速の上昇、含水率の減少およびベース燃料の飽和温度の低下とともに燃え広がり速度は上昇することを明らかにした。液滴間隔の変化とともに燃え広がり速度は極大値を示すことならびに水中油滴形乳化燃料液滴列における燃え広がり速度は油中水滴形のそれに比べて大きいことを示した。また、光学的観察により水中油滴形乳化燃料液滴は燃焼過程において相分離を生じマイクロ爆発するが、油中水滴形乳化燃料液滴の燃焼過程では相分離せずマイクロ爆発は発生しないことを明らかにした。さらに、乳化燃料液滴列におけるマイクロ爆発について第4章と同様にマイクロ爆発発生待ち時間分布に確率モデルを適用して統計的性質を検討し、待ち時間分布は液滴

位置、液滴間隔および周囲空気流速によらず形状母数 2 の摩耗故障型ワイブル分布で整理できること、これらの因子はマイクロ爆発発生率に影響を及ぼさないこと、ならびに単一液滴の結果と同様であることを明らかにした。

第 6 章では、第 3 章での推定に基づき、第 4 章で得られた高温壁面上における乳化燃料液滴のマイクロ爆発発生率を乳化燃料液滴温度と乳化燃料液滴内水分量で整理するとともに、通常重力環境下および微小重力環境下で懸垂乳化燃料液滴を燃焼させた場合の実験結果をあわせて検討し、マイクロ爆発発生率に関する実験式を導出した。乳化燃料液滴周囲の環境（高温壁面の有無、火炎の有無、重力加速度の大きさ）やベース燃料および含水率の違いにかかわらず、マイクロ爆発発生率はマイクロ爆発発生時の乳化燃料液滴温度と乳化燃料液滴内水分量を用いた実験式で表現できることを明らかにした。

第 7 章は結論で、本研究で得られた結果を要約した。

## 審査結果の要旨

本論文は、乳化燃焼法に関する基礎的な知見を得ることを目的として、高温壁面上における乳化燃料液滴の蒸発、燃焼およびマイクロ爆発ならびに一様空気流中における乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動とマイクロ爆発に関する研究をまとめたものであり、次のような成果を得ている。

- (1) 水中油滴形乳化燃料は、温度上昇とともに初期分散相であるベース燃料液滴の凝集が進行し、やがて水中油滴形から油中水滴形への転相が生じる。その後、新たに分散相となった水が凝集し、最終的に水相とベース燃料相に二分される相分離現象を生じることなどを示した。
- (2) 最弱リンクモデルおよびワイブル分布に基づく確率モデルからマイクロ爆発発生に関する特性値を導出した。また、均一核生成理論および不均一核生成理論に基づく現象モデルからマイクロ爆発発生率が乳化燃料液滴温度および乳化燃料液滴内水分量で表される可能性があることを提示した。
- (3) 高温壁面上における乳化燃料液滴のマイクロ爆発および寿命時間について調べ、マイクロ爆発発生待ち時間分布が形状母数 2 の摩耗故障型ワイブル分布で整理されること、ベース燃料の飽和温度の上昇とともにマイクロ爆発発生待ち時間は短くなること、乳化燃料は壁面温度の上昇とともに、液膜蒸発、液膜蒸発から沸騰蒸発への移行、液膜蒸発から沸騰蒸発を経て球状蒸発への移行、ならびに球状蒸発、の四つの蒸発形態を示すことなど多くの知見を明らかにした。
- (4) 乳化燃料液滴列を燃え広がる火炎の挙動とマイクロ爆発について調べ、周囲空気流速の上昇とともに燃え拡がり速度は上昇すること、マイクロ爆発発生待ち時間分布は液滴位置によらず形

状母数 2 の摩耗故障型ワイブル分布で整理できることなどを明らかにした。

(5) 乳化燃料液滴周囲の環境やベース燃料および含水率の違いにかかわらず、マイクロ爆発発生率はマイクロ爆発発生時の乳化燃料液滴温度と乳化燃料液滴内水分量を用いた実験式で表現できることを明らかにした。

これらの諸成果は、乳化燃焼法をより深く理解する上で有益であり、かつ乳化燃焼法改善に対して重要な知見を提供したものであって、工学的ならびに工業的に寄与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必要な能力と学識を有していることを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。