

論文の内容の要旨

氏名：鈴木 圭

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：エマルジョン燃料液滴の燃焼過程における二次微粒化に関する研究

気候変動問題と石油枯渇への懸念から、バイオマスに由来するバイオディーゼル燃料、バイオエタノールなどの導入が進められている。これらに加えて DME および GTL, FT 合成燃料などの新燃料の利用も期待され、今後液体燃料の多様化はますます促進されると考えられる。新燃料を従来型炭化水素系燃料に混合し実機利用していくことは、化石燃料の枯渇問題を緩和させる有用な手法である。このような燃料多様化時代では、既往の混合燃料に加え、不溶性燃料を組み合わせたエマルジョン燃料も選択肢となる。その場合の燃料設計では、燃焼制御や燃焼効率向上は考慮されるべき課題といえる。燃料設計においては化学反応の観点から燃焼改善を目指すことが一般的である。一方で低沸点燃料を混入させた混合燃料や水を混入させたエマルジョン燃料の噴霧燃焼では二次微粒化現象が観察される。二次微粒化は、噴霧により微細化された液滴内部において低沸点成分が過熱されて突沸し、母液滴を崩壊させる再微粒化現象であり、マイクロ爆発、パフィンと呼ばれる形態が確認されている。二次微粒化の発生は燃焼場の混合を促進するとともに、水の蒸発による潜熱吸収により火炎温度が低下するなど、燃焼場に物理的な効果を及ぼし、未燃炭化水素や窒素酸化物の排出低減に有効であるとされている。近年バイオ燃料の利用が推進され、ガソリンエンジンではエタノール 3% を混入させた E3 などが用いられている。一方、ディーゼルエンジンでもバイオ燃料の利用が促進される傾向にあり、バイオマスに由来する燃料による化石燃料の代替化は穀物価格高騰の懸念を引き起こすまでに至っている。バイオエタノール、バイオディーゼル燃料 (BDF) の利用は地球温暖化対策として打ち出されているものの一環であるが、それらは非常に多種多様であり、燃焼特性などについては十分な知見が得られていないまま先行している傾向にある。一方で、流体革命以降の人類の発展は石油に依存してきた歴史があり、現在の生産、処理、供給などのあらゆる社会基盤が石油を対象として構築されている。今後のバイオ起源燃料は既存の石油系燃料への添加物として展開する方向性が妥当な現状にある。このようななか有効になるのが、二酸化炭素排出低減化だけでなく、その混入を利用した燃焼性の改善であり、燃料の多成分化による燃焼制御である。燃料成分の制御に基づく燃焼制御技術のひとつに、燃料に水を混入させたエマルジョン燃料がある。エマルジョン燃料は石油系燃料に水を混入させて窒素酸化物や粒子状排出物を抑制するための燃焼制御技術の一つとして位置づけられ、有害燃焼排出物の抑制に効果が期待できる。今後エマルジョンと同様な視点からバイオ燃料成分を混入させた影響を明らかにすることによって、バイオ燃料のより有効な利用法について様々な面から検討が必要であると考えられる。以上のことから、エマルジョン燃料液滴に着目し、その二次微粒化発生に対するエタノール混入、BDF 混入などの影響を体系的に検討した。

本論文は全 5 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、はじめに気候変動問題、環境影響などを加味した燃料供給の課題を示している。そして燃料多様化時代においては、発熱量の確保のみではなく、燃焼排出物の制御、燃焼効率の向上が求められており、それを目的とした燃焼制御に寄与できる燃料の構成の重要性を述べている。そのうえで燃料多様化の一環として不溶性燃料の組み合わせであるエマルジョン燃料の概略とその燃焼過程の特徴である二次微粒化現象の発現とその効果について解説している。これらに基づき、既往の研究成果を、単一液滴燃焼、噴霧燃焼に分けて示し、さらに二次微粒化発生要因となる過熱液体の発泡現象、確率モデルおよび本研究で適用した極値統計理論について示し、そのうえで、本研究の位置づけ、および目的を述べている。

第 2 章は、炭化水素/水エマルジョン燃料においては水の蒸発による潜熱吸収によって発生熱量が大幅に減少することから、エマルジョンの添加水分の一部をアルコールに置き換えたものを研究対象とし、エタノール添加炭化水素/水エマルジョンの液滴燃焼時の二次微粒化特性、特にマイクロ爆発発生について検討を行った。実験では n-ヘキサデカンをベース燃料とし、水およびエタノールを混入させ界面活性剤で安定化させたエマルジョンを用いた。n-ヘキサデカンおよび界面活性剤の体積割合はそれぞれ 0.7 および 0.03

で一定とし、添加水分の一部をエタノールに置き換えた試料を用いた。エタノールの体積割合は 0.0, 0.03, 0.05, 0.08 と変化させた。初期液滴直径は 1.1mm および 1.3mm とし、通常重力下静止空气中で燃焼実験を行った。またエマルジョン液滴燃焼時の相分離現象に対するエタノール添加の影響をガラス管内に供試燃料を封入し加熱実験で明らかにしている。液滴燃焼では、マイクロ爆発発生までの待ち時間を計測するとともに、懸垂線をプローブとした Acoustic Emission (以後、AE) 計測によりマイクロ爆発発生の強度の測定を行った。併せて液滴温度測定を行うとともに、マイクロ爆発待ち時間分布をマイクロ爆発の初期発生までの待ち時間 (最小発生待ち時間) と、マイクロ爆発発生待ち時間に分けて検討を行った。その結果、後者はワイブル分布で近似でき、その形状母数は 2 となること、マイクロ爆発発生までの待ち時間はエタノール含有により長くなる傾向があるが、その主な要因は最小発生待ち時間の遅れであることを示した。併せて待ち時間分布と温度計測結果を用いてマイクロ爆発発生時の温度と AE ピーク電圧の算術平均を検討した結果、液滴直径、エタノール含有に関わらず同じ温度領域で発生するマイクロ爆発の AE ピーク電圧は同じであること、また低い温度領域で発生するマイクロ爆発の AE ピーク電圧は低くなることなどを明らかにした。

第 3 章は、環境負荷が小さく、植物油から生成される油系燃料である BDF に着目し、BDF/水エマルジョン燃料について液滴燃焼実験を行い、二次微粒化発生、特にマイクロ爆発発生を検討することで燃料設計に寄与するための基礎的データを示した。ここでは BDF として脂肪酸メチルエステル (FAME) および模擬燃料としてオレイン酸メチルエステル (OME) をベース燃料として、エマルジョン燃料液滴燃焼実験を行った。燃料成分としてはベース燃料の一部を n-ヘキサデカンに代替した場合、エタノールを加えた場合、含水率を変化させた場合などについて、液滴燃焼時の二次微粒化へ及ぼす影響を検討した。これらの結果、第 2 章と同様に、最小発生待ち時間とマイクロ爆発発生待ち時間に分けて議論できること、および後者がワイブル分布で近似できることが明らかとなった。一方で後者については、形状母数は一定値を示さず、かつ複合型ワイブル分布となる場合も見受けられることなどを示した。

第 4 章は、第 2 章および第 3 章で得られた成果を深化させた総合考察である。ここでは、炭化水素/水エマルジョンおよび OME/水エマルジョンにおいて、エタノールを添加した場合のマイクロ爆発発生率の時間変化を検討することにより、二次微粒化を有効にするための燃料設計上の指針について示した。

第 5 章は結論であり、第 2 章から第 4 章で得られた知見を総括するとともに、今後の展望を示した。

以上