

電極形状がヘキサデカン/水エマルジョン燃料の静電微粒化に及ぼす影響

日大生産工(院) ○大盛 清 日大生産工 今村 宰
日大生産工 秋濱 一弘 日大生産工 山崎 博司

1 緒言

現代の私達は高度に発展した文明を支えるため、石炭や石油、天然ガスといった化石燃料を大量消費している。その結果として我々人類は急速な産業発展を遂げ、豊かな生活を手に入れることができた。しかし、その恩恵の一方で化石燃料は有限であるため資源の枯渇が心配されているのが現状である。化石燃料には、石油、石炭、天然ガスなどがある。産業革命以降、自動車や飛行機などに用いられてきた石油燃料は、エネルギー密度が高く常温において液体で持ち運べるため輸送機関の燃料としての需要が高い。しかし、石油燃料の利用が急速に拡大したため、その可採年数は残り数十年に差し迫っている。そのため、限りある石油資源を有効に利用する技術を画一することが求められている。また、自動車やガスタービン、燃焼炉からの排出ガスに含まれる窒素酸化物や粒子状物質、すすなどの排気物質は地球温暖化や大気汚染などを引き起こす原因として問題視されている。そのため、排気物質の抑制や環境に配慮した持続可能なエネルギーの検討を余儀なくされている。

これらの観点から今後、使用する燃料の無駄を減らす省エネルギー技術、環境負荷を低減できる新エネルギー技術を推進していくことが急務である。

近年、環境負荷の低減や燃焼効率の向上のため、エマルジョン燃料を代替燃料として用いることが検討されている。エマルジョン燃料とは、燃料油に一定割合の水と界面活性剤を添加し、攪拌することで燃料中に水を分散させた乳白色の燃料である。エマルジョンには、油に水を分散させた油中水滴型と水の中に油を分散させた水中油滴型がある。燃料として使用する場合には、所要する水添加率の関係から油中水滴型が一般的である。エマルジョン燃料の燃焼

では、水と燃料の沸点の違いから油滴内に水粒子が急激に気化膨張し、マイクロ爆発が起きる。その二次微粒化に噴霧粒子の微粒化が促進されPM やすすの排出を低減することができる。また、水の蒸発潜熱により燃焼温度が低下し、窒素酸化物の排出量を低減することができる。一方でエマルジョン燃料は高粘性流体であるため、微粒化が困難であることが欠点として挙げられる。現在、自動車やガスタービン、燃焼炉の燃焼法には、多くの場合噴霧燃焼が用いられる。噴霧燃焼は有効な燃焼法の一つであり、液体燃料を噴射器により微粒化し、燃料が持つ総表面積を増加させることで燃焼効率を向上する方法である。エマルジョン燃料は高粘性燃料であるため、従来の燃料噴射器を用いて噴霧燃焼させることは困難である。そこで、本研究ではエマルジョン燃料のような高粘性流体の微粒化技術として静電微粒化技術を応用することを検討する。

ガソリンなどの炭化水素燃料では極性を持たないため静電微粒化は適用できないが、水を加えたエマルジョン燃料であれば、水が極性を持つため電気的なエネルギーの影響を受ける。実際にエタノールなどの極性を持つ液体を対象として、高電圧を印加した液体を細管から流出させると細管先端部から分裂現象を起こすことが報告されている¹⁾²⁾³⁾。これは静電微粒化と呼ばれ、液体が流れる細管と電極との間に高電圧を印加することにより液体は液柱、液糸となり、液滴へと分裂し微粒化する方法である。静電微粒化の分裂形態にはスピンドル、コーンジェット、マルチジェットといった噴霧モードがある。これらの分裂形態は印加電圧や細管及び電極の形状による電界強度の大きさ、電気伝導率や表面張力、粘度といった液体の物性などにより変化することが知られている。本研究では知見の少ないエマルジョン燃料に静電

Effect of electrode shape on the electrostatic atomization of the hexadecane / water emulsion fuel

Kyoshi OHMORI, Osamu IMAMURA, Kazuhiro AKIHAMA and Hiroshi YAMASAKI

微粒化技術を適用させ、静電微粒化装置の電極形状を変化させて微粒化機構や特性の傾向を把握することを目的とするものである。

2 実験装置および条件

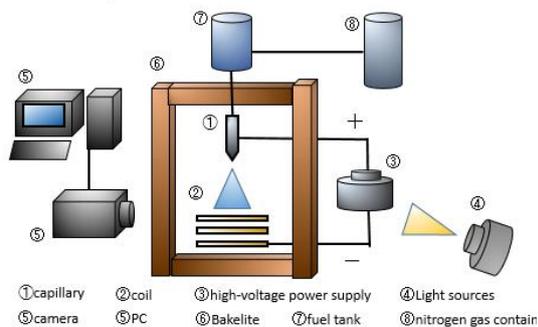


Fig.1 The experimental device

2. 1 実験装置

Fig. 1に実験措置の概念図を示す。実験装置は、エマルジョン燃料を静電微粒化装置により微粒化する微粒化系とエマルジョン燃料の静電噴霧を撮影し解析する観察系に分別できる。微粒化系は噴射系と静電微粒化装置で構成されている。噴射装置は燃料タンクと噴射用の細管からなり、燃料タンク内に窒素ガスを導入することで噴射圧を調整できるようになっている。エマルジョン燃料は高粘性流体であるため、通常の重力では内径の小さい細管ノズルでは噴射口から噴出しない。そこで窒素が充填してあるガスボンベからガスを供給し、燃料タンクにあるエマルジョン燃料を強制的に大気中に噴出させる。エマルジョン燃料は、通常、圧力エネルギーにより微粒化しようとしても液糸以上に微粒化することは難しい。しかしながら、以下に示すように静電気エネルギーを加えることで液滴群へと微粒化することが可能であった。噴射用の細管は静電微粒化装置の片側の電極を兼ねている。静電微粒化装置の電極の構成としては、細管ノズルの先端部からある一定距離を置いてもう片側の電極を固定する。本報では、正極側を細管ノズルとして、エマルジョン燃料が微粒化するように直流電圧を電極間に印加した。なお細管ノズルと燃料タンクの間も絶縁するためにチューブ配管を用いた。静電微粒化の研究例の中には網状の電極が用いられるものがあるが、その場合には高粘性流体の

エマルジョン燃料は網を通過せず網状の電極に蓄積してしまうため、一義的な現象を得られないばかりか、電極間の距離が近づいて放電現象を発生させ非常に危険である。そこで本研究では安全性を考慮し、エマルジョン燃料が蓄積して放電現象を起こさないように中央が筒抜けとなっているコイル形状の電極を採用することにした。電界強度は静電微粒化において噴霧全体の粒径を左右する大きな要因であると考えられる。本実験で用いたような電極形状の場合、電界分布は一様ではなく、静電噴霧中に電界の強度と分布を適切に把握する必要があるが、本実験においては印加電圧を用いたコイル形状電極の端面までの距離を割った値を電界強度と定義する。

次に撮影系であるが、本研究では静電微粒化を用いてエマルジョン燃料を微粒化させるが、静電微粒化を用いた場合の噴霧は、従来とは異なることが予想されるため、静電噴霧の時間的な変化を考慮に入れて計測を行う必要がある。静電噴霧の全体像を撮影する場合と拡大画像を撮影する場合には異なる装置を用いた。全体像撮影時には、カメラNikon製D7100、レンズNikon製NikkoR18-300mm、光源、トレーシングペーパーを用いて背景散乱光写真法で静電噴霧を撮影した。拡大画像撮影時には、ハイスピードカメラmemrecam ci、レンズNikon製NikkoR18-300mm、ベローズ、エクステンションチューブ、光源を用いて直接光源の影となる静電噴霧の様子を拡大撮影した。ハイスピードカメラで、エマルジョン燃料の静電噴霧を複数枚撮影し、ソフトウェアにより画像解析することで粒径を測定し平均粒径や粒径分布といった微粒化特性を把握する。粒径計測は、形成した静電噴霧のコイルから10mm上の領域を拡大撮影した。ソフトウェアImagejを用いて取得した動画から100枚の画像を抽出し、その画像全てにガウシアンフィルタをかけて、その後2値化画像を作成し、各々の粒子の投影面積を算出する。条件ごとにこの処理を施した。そこから粒径分布及び平均粒径を算出した。拡大撮影した画像から粒径解析により液滴分布や平均粒径といった微粒化特性を把握した。

2. 2 実験条件

静電微粒化では、電界の分布および強度が極めて大きな影響を与えるパラメータであると考えられる。そのため本研究では、コイル巻き数、コイル内径といった電界に影響を与えると考えられる電極の形状を変化させて実験を行

った。本実験で変化させた電極形状のパラメータはコイル巻き数 10 回, 20 回, コイル内径 50mm, 40mm の全 4 条件である。また, その他のパラメータは印加電圧 7kV, 細管直径 0.58mm, 電極間距離 30mm に固定して実験を行った。燃料ガス加圧 P は全体像撮影時には $P=0.2\text{MPa}$, 拡大画像撮影時には $P=0.3\text{MPa}$ である。静電噴霧の全体像撮影時はシャッタースピード 1600fps, 焦点距離 300mm, F 値 6.3, フレームレート 30fps の撮影条件で撮影した。また, 拡大撮影時はシャッタースピード 2000fps, 焦点距離 300mm, フレームレート 100fps である。

なお燃料には, すべての実験においてヘキサデカン/水のエマルジョン燃料を用いた。

3 実験結果

3.1 噴霧の様子

Fig.3 にコイル 10 回巻き, コイル径 50mm の場合の実験結果を示す。図はおよそ 0.5s おきの経時変化を示している。これらの画像を見ると, まず細管から噴射されたエマルジョン燃料は液柱状態で放出され, その後液糸, 液滴へと変化していくことがわかる。液糸先端部では帯電しているエマルジョン燃料が反発しあって分裂している様子が見受けられる。また, エマルジョン燃料はコイル電極を用いた静電微粒化装置で微粒化すると螺旋状の噴霧を形成することがわかる。また, 噴霧は定常的ではなく, 非定常的に形成されていることがわかる。このような非定常性は, 通常の圧力エネルギーによる噴霧とは異なり本微粒化手法の特徴的な現象として捉えることができる。

3.2 コイル巻き数の影響

Fig.4 には, Fig.3 と同様な条件で, コイルの巻き数を 20 回巻きにした場合の経時画像を示している。Figs. 3,4 を比較すると, コイル巻き数を倍に増やした状態でも噴霧の様子にはあまり変化は見られず, 巻き数は静電微粒化の特性に大きな影響を与えないように見受けられる。Fig. 5 にはコイル巻き 10 回巻き, 20 回巻きに対応する粒径分布を示す。図から巻き数 10 回と 20 回の時の粒径のピーク値はほとんど同じであった。また, ザウター平均粒径を算出したところ, 10 回巻き, 20 回巻きはそれぞれ $26.70\mu\text{m}$, $25.34\mu\text{m}$ であった。他方で巻き数の少ない場合の方が, 相対的に大きな粒径の液滴

が存在しているようにも見受けられるが, これは巻き数が異なることによる電界の一様性と関連しているものと推測される。

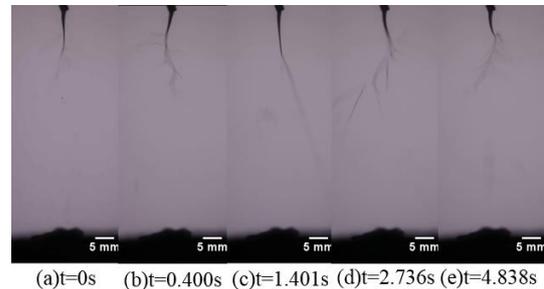


Fig.3 State in nonstationary spray which is formed when the coil 10-turn

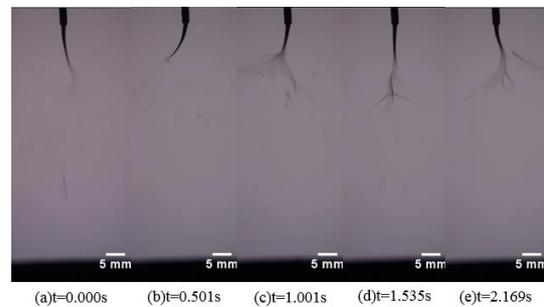


Fig.4. State in nonstationary spray which is formed when the coil 20-turn

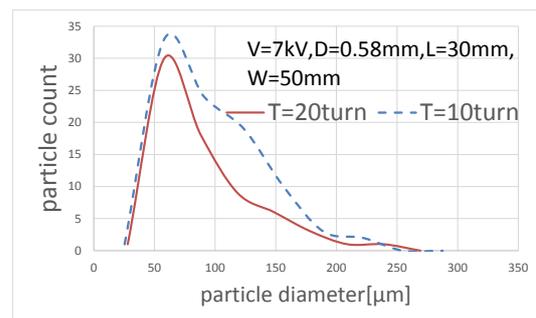


Fig.5 The particle size distribution to changes of the number of coil turns

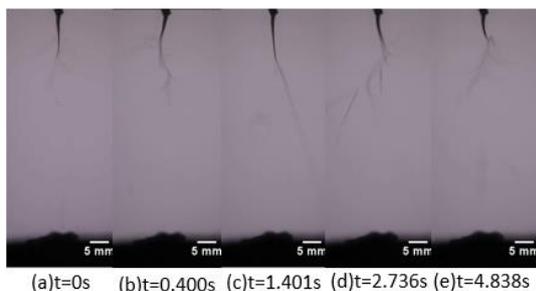


Fig.6 State in nonstationary spray which is formed when the coil diameter 50mm

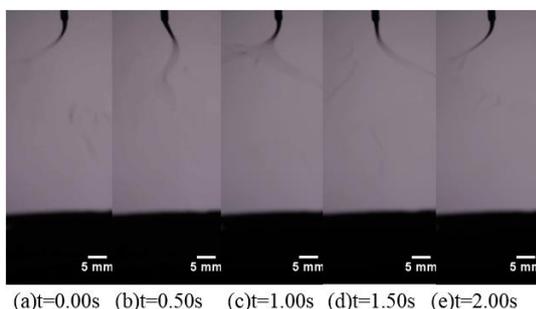


Fig.7 State in nonstationary spray which is formed when the coil diameter 40mm

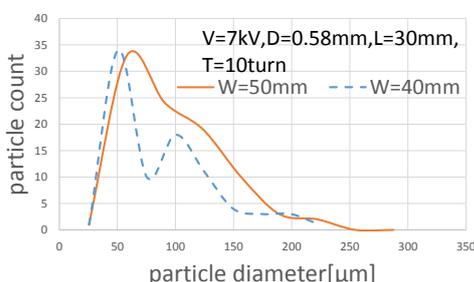


Fig.8 The particle size distribution to changes of the number of coil turns

3. 3 コイル径の影響

Figs. 6, 7 にそれぞれコイルの内径 50mm, 40mm の条件で形成した静電噴霧の様子を示す. Figs. 3, 4 のときと同様に非定常的な噴霧を形成している. コイルの内径が 50mm と 40mm のときの噴霧を比較すると, 内径が小さくなることで細管から噴射された液柱の傾きが大きくなっていることがわかる. これから液柱の形状は, 電気力線の方向よりも電界強度に強く依存することが想像される.

Fig.8 にコイル内径 40mm, 50mm に対応する粒径分布を示す. 図を見ると, コイル径が小さくなることで粒径のピークは小さくなって

ることがわかる. また, コイル内径 40mm, 50mm において, それぞれザウター平均粒径は $26.70\mu\text{m}$, $22.52\mu\text{m}$ であった. このことから, コイルの内径を小さくすると粒径は小さくなるということがわかる. 他方で, コイル径が 40mm の場合には単純な粒径分布をしておらず, このような微粒化特性については引き続き調査, 検討が必要と思われる.

4 結言

ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料に静電微粒化技術を適用し, その基礎特性について調べた. 特に電極形状に着目して, 細管およびコイルの対向電極を製作し, コイルの巻き数や径を変化させて実験を実施した. その結果, 得られた成果は以下のとおりである.

1. 本研究における静電微粒化においては非定常な微粒化現象が観察された.
2. コイル巻き数を変化させたところ, 印加電圧および電極間距離が一定であれば, 形成した静電噴霧の粒径分布や平均粒径に大きな変化は見られないことがわかった.
3. 電圧および電極間の相対位置を一定としてコイルの内径を小さくすると, 形成された静電噴霧の噴霧が広がる角度が増加し, 平均粒径は小さくなることがわかった. これから液柱の形状は, 電気力線の方向よりも電界強度に強く依存することが推定された.

参考文献

- 1) Zeleny, J “The electrical discharge from liquid points”, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Physical Review* 3 (2): (1914) 69-91.
- 2) Zeleny, J “Instability of electrified liquid surfaces”, *Physical Review* 10 (1): (1917) 1-6.
- 3) Deng, W.Klemic, J. F.Li, X.Reed, M. Gomez,A.“Increase of electrospray throughput using multiplexed microfabricated sources for the scalable generation of monodisperse droplets”, *Journal of Aerosol Science* 37 (6):(2006) 696-714
- 4) Geoffrey, T” Disintegration of Water Drops in an Electric Field”, *Proc. R. Soc. Lond. A* 28 July 1964 vol. 280 no. 1382 383-397.