

ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料を用いた 電界印加特性が静電噴霧に与える影響

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

産業革命以降、世界各国で自動車や航空機といった内燃機関が復旧し、我々の生活への利便性は向上している。その反面、二酸化炭素(CO₂)や窒素酸化物(NO_x)、粒子状物質(PM)の排出による環境汚染や化石燃料の枯渇が問題視されている。そのため、今まで以上にクリーンかつ効率的な燃料の利用することが求められている。内燃機関では液体燃料を高効率に利用するために噴霧燃焼という燃焼方式が用いられている。噴霧燃焼とは液体燃料を数 μm から数百 μm の霧状の液滴群に微粒化し、燃焼させる燃焼方式のことであり、素早く安定な火炎を得ることができることが可能なため工業用に広く用いられている。また、噴霧燃焼を形成に用いられる液体微粒化技術は、内燃機関の噴霧燃焼に加えて、農薬や化学、食品、環境、医薬、材料等の幅広い分野で利用がされており、環境汚染や省エネルギーの問題に直接関係している。また、液体燃料の微粒化法には、圧力や遠心力、気体エネルギー、振動、音波、音響エネルギーなどの力学的エネルギーに加え、電気エネルギーおよび熱エネルギーにより液体噴霧を形成する方法がある¹⁾。

通常、内燃機関の噴霧燃焼においては圧力エネルギーを用いた微粒化方式が主流であるが、本研究では高粘性流体の微粒化の可能性の提唱するため、電気エネルギーを用いた液体の微粒化方式である静電微粒化法に着目する。静電微粒化とは、液体噴射口と対面電極に5から50kVの高電圧を印加し流出する液体を帯電させることで、分裂させる方法である。電界強度を変化させることで数百 μm の均一粒から数 μm の噴霧まで広範囲な微粒化が可能である。また、静電微粒化法を用いることで通常の圧力エネルギーを用いた微粒化方法では困難な高粘性流体を容易に微粒化することが可能であることを過去の研究で報告した²⁾。

そこで、環境適合技術として高粘性のエマルジョン燃料の静電微粒化の可能性について示唆した。エマルジョン燃料は、混ざり合わない燃料油と水に界面活性剤を添加し、攪拌させることで強制的に分散させた乳白色の液体である³⁾。エマルジョン燃料は、油中に分散した水が比較的低沸点であるため、燃焼させるとマイクロ爆発を起こし、燃料が空気中に分散し、空気との混合が促進され、燃焼効率は向上が期待される。また、使用燃料が大幅に削減されるため、その分だけCO₂やNO_x、PM等の排出が削減できる。これらの観点からエマルジョン燃料は環境負荷や省エネルギーを考慮した燃料として注目を浴びている。しかし、エマルジョン燃料が燃料油の割合を高くすると高粘度の燃料が精製されるため、エネルギー密度の高いエマルジョン燃料を微粒化するためには、通常の微粒化方法では霧化が容易ではない。静電微粒化法は、このような高粘性流体においても流体の電気伝導率が高い場合、帯電により液体同士に反発力が発生するため微粒化が可能である。

そこで本研究においては、静電微粒化を用いた高粘度エマルジョン燃料の微粒化現象について取り扱う。しかし、静電微粒化の現象については未だ未解明な部分が多くいうえ、高粘度エマルジョン燃料は擬塑性流体の性質を持つため、より現象が複雑化してしまう。そこで本研究においては、形成した高粘性エマルジョン燃料の静電噴霧に対して電界強度や電極サイズを変化させ電界印加特性が及ぼす影響を調査する。

2 実験原理

2-1 噴霧モードおよび電界強度

静電微粒化では、液体が通過する細管ノズルに高電圧を印加することで静電気力と表面張力の相互作用により液柱や液糸が形成され、それらが下流において分裂し噴霧が形成される。その分裂形態はスピンドルモード、コーンジェ

Effects of electric field characteristics on the electrostatic spray of n-hexadecane /
water emulsion fuel

Kiyoshi OHMORI, Osamu IMAMURA, Kazuhiro AKIHAMA and Hiroshi
YAMASAKI

ットモード、マルチジェットモードなどが存在する⁴⁾。これらの噴霧モードは、静電微粒化現象を支配するパラメータに影響で変化する。静電微粒化の現象を支配するパラメータには、印加電圧や細管の内外径、電極形状、細管および電極間距離、液体の流量といった実験装置のパラメータに加え、密度や粘度、表面張力、電気伝導率、誘電率といった流体の物性値が現象に関与していることが知られている⁵⁾。

通常用いられる圧力エネルギーによる微粒化と比較して関係するパラメータが多く現象が複雑となり、整理が困難なため、未だ一般式が確立されていない。本研究では、実験装置のパラメータである印加電圧および細管・電極間距離を電界強度というパラメータを用いて整理する。電界強度 $E[V/m]$ は、次式で表される。

$$E = \frac{V}{L} \quad (1)$$

ただし、 V は印加電圧 $[V]$ 、 L は電極間距離 $[m]$ である。

また、静電微粒化においては、細管先端部において、慣性力や電気力、表面張力、粘性力などの力が働いていると考えられる。そこで、本研究においては、慣性力および電気力がどの程度現象に影響を及ぼしているかを解明する。慣性力 $F_{Inertia}$ と電気力 $F_{Electric}$ をそれぞれ次式に定義する。

$$F_{Inertia} = \rho v^2 L^2 \quad (2)$$

$$F_{Electric} = \frac{IEL}{v} \quad (3)$$

ただし、 ρ は密度 $[kg/m^3]$ 、 v は流体の流速 $[m/s]$ 、 L は代表長さ $[m]$ 、 I は電流 $[A]$ 、 E は電界強度 $[V/m]$ である。

2-3 スピン周波数

エマルジョン燃料の静電微粒化現象においてはある範囲の電界強度においては細管先端において液糸が発生し回転しながら、その先端から液滴が分裂する非定常な微粒化現象が生じる。そこで、微粒化現象を巨視的に捉えるため、単位時間当たりの液柱の回転速度をスピン周波数 $H[Hz]$ とし、定義式を次式に示す。 $H=$

$$H = \frac{R}{T} \quad (4)$$

ただし、 R は液柱の回転数 $[r]$ 、 T は単位時間 $[min]$ である。

2-4 拡大撮影および粒径測定

微粒化特性においては噴霧の平均粒径や粒径分布が燃焼現象に大きく影響することが知られている。しかし、それらのパラメータは、極めて微小な空間での現象であり、通常の撮影

方法では微粒化特性を捉えることは難しい。そこで、本研究においては、撮影するカメラと撮像素子の距離を長くし、被写体である粒子群に接写することで、拡大撮影する方法を用いる。また、得られた画像は、ソフトウェアImageJを用いて粒子判別法を用いて粒子とそうでない部分の二値化を行い、平均粒径および粒径分布を算出した。

3 実験装置および実験条件

3-1 静電微粒化装置

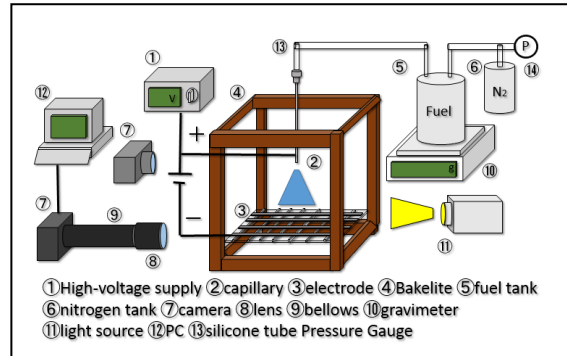


図1 実験装置の概略図

図1に実験装置の概略図を示す。静電微粒化装置は、図に示すように流体を通過させる細管とその対面に電極を固定し、そこに高電圧を印加する装置になっている。細管は内径、外径、長さがそれぞれ1mm、0.6mm、70mmである。対面電極には線形0.7mm、目合4.38mmの金網を使用した。また、高電圧を印加する電源には、GREEN TECHNO製高電圧電源GS5Nを使用した。また、高電圧下で実験を行うため、実験装置の周辺は絶縁体であるベークライトの木枠を用いて周囲への放電を防止した。燃料流体はユニコントロールズ製ステンレスタンクTB1Nに封入し、ガスタンクより窒素を供給することで細管まで圧送した。そのときの圧力は右下精器製造製ブルドン管式圧力計JQ0507048で測定を行った。また、流体の流量および流速はエアードレイ製電子天びんEK-3000iを用いてタンク内の燃料重量から測定した。

3-2 撮影装置

撮影装置は液体噴霧の微粒化機構および微粒化特性を把握するため、それぞれ噴霧全体の撮影装置と噴霧の微小な一部分を撮影するための拡大画像の撮影装置をそれぞれ構築した。噴霧全体の撮影装置には、Canon製デジタルビデオカメラEOS60D、Canon製レンズEFS55-250mmを用いた。拡大撮影の装置には、Nikon製デジタルビデオカメラD7100、Nikon製レンズAF-S NIKKOR18-300mm、レンズ-

撮像素子間の距離を伸ばし、外部の光を遮断するための自作の黒筒を用いた。

3-3 供試燃料

表1 含水率20%O/W型エマルジョン燃料の混合割合

名称	割合[%]
ノルマルヘキサデカン	77
純水	20
ポリオキシエチレンアルキルエーテル	3

表1に供試燃料に用いたO/W型ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の燃料油および水、界面活性剤の混合割合を示す。また、含水率20%におけるO/W型ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の物性値の測定を行った結果、密度、表面張力、電気伝導率0.794kg/L、2.75mN/m、12.9kS/mはそれぞれである。測定には、それぞれエーアンドデイ製電子天びんEK-3000i、毛管上昇法、交流二電極法を用いた。また、粘度の測定にはBROOKFILD製回転粘度計DV-I Primeを用いた結果を図2に示す。

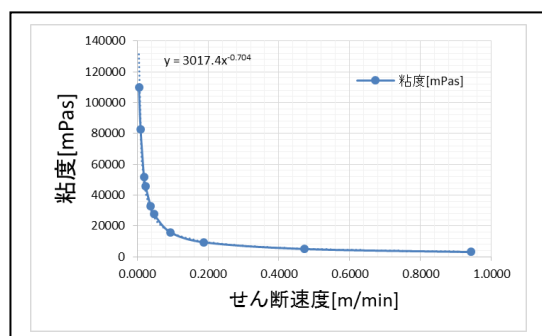


図2 含水率20%ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の粘度測定結果

3-4 実験条件

微粒化機構を把握するために微粒化装置を用いて含水率20%ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の静電噴霧を形成した。実験は電界強度の影響を見るため、直流印加電圧Vを9kV、12kV、15kV、18kVと変化させて行った。その他の実験条件は、細管内径D=0.6mm、電極間距離L=30mm、電極サイズ100mm×100mm、流量Q=6±1.5mL/minである。また、撮影条件は、画面サイズ1280×720、フレームレート60p、シャッタースピード4000、レンズの焦点距離f=250mmである。シグマ光機製光源SLA-100の光をトレーシングペーパーにより拡散させた光を背景光として用いた。

微粒化特性として直流印加電圧15kV時の噴霧粒子の拡大画像より平均粒径および粒径分

布を算出した。その他の条件は、細管内径D=0.6mm、電極間距離L=30mm、電極サイズ100mm×100mm、N₂ガス圧力0.192MPa(G)、液体流量Q=6mL/min、画像サイズ6000×4000、焦点距離f=220mm、被写体・レンズ間距離a=215mm、レンズ・撮像素子間距離b=1610mm、シャッタースピード8000fps、露出0.7、撮影範囲は細管下流15mmの縦2mm×横3mmの領域である。光源は背景光として直接用いた。また、撮影枚数は0.1sになるように800枚の画像を撮影し、ソフトウェアImageJを用いて画像の二値化処理を行い、粒径を算出した。

4 実験結果および考察

4-1 高粘度エマルジョン燃料の静電噴霧

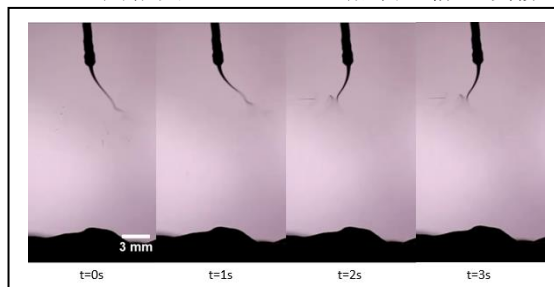


図3 直流印加電圧15kV時の含水率20%ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の静電噴霧の経時変化

図3に直流電圧を15kV印加した際に微粒化されたエマルジョン燃料の静電噴霧の様子を1秒間毎に示す。高粘度のエマルジョン燃料は図に示すように、細管先端から数mm下まで細い液糸が形成され、その先端で微小な液滴が生成されている。また、液糸は、電界の影響により非定常的に回転しながら先端に噴霧を形成している。これは、コーンジェットモードと呼ばれる噴霧形態であり、細管先端の液体メニスカスが液表面の電荷によって引き伸ばされコーンジェットと呼ばれる円錐形状になり、その先端から噴霧が形成されているものと考えられる。

4-2 スピン周波数の影響

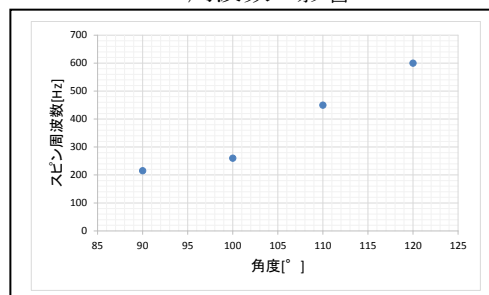


図4 角度とスピン周波数の影響

電極サイズとスピン周波数の影響を調査するため直流印加電圧を15kVに固定し、電極サイズを100mm×100mm、85.6mm×85.6mm、71.5mm×71.5mm、6mm×6mmに変化させた。それぞれ静電噴霧を形成する電界の角度が120°、110°、100°、90°となる。図4に角度とスピン周波数の影響を示す。角度が増加するにつれてスピン周波数の増加が見られる。

4-3 慣性力と静電気力の影響

表2 細管先端の流体にかかる慣性力と電気力

慣性力[mN]	電気力[mN]	電気力と慣性力の比
4.94	1.21	0.245
4.94	2.77	0.561
4.94	5.48	1.110
3.05	12.34	4.047

表2に実験値から算出した細管先端のエマルジョン燃料にかかる慣性力と電気力の関係について示す。細管先端にかかる慣性力がある程度固定し、印加電圧を変化させて電気力を増加させた場合、電気力が5mNを超えた付近で電気力が慣性力を上回っていることがわかる。

4-4 粒径分布および平均粒径

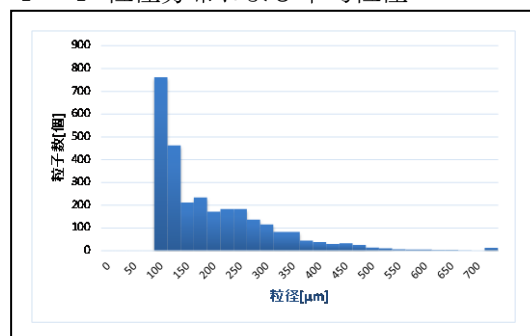


図5 直流印加電圧15kV時の静電噴霧における粒径分布

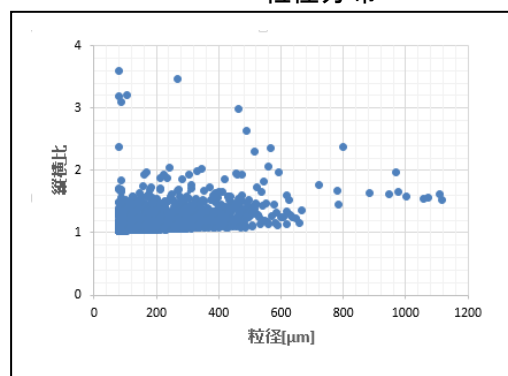


図6 直流印加電圧15kV時の静電噴霧における粒子群のアスペクト比

含水率20%O/W型ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料に15kVの電圧を印加した噴霧を拡大撮影し、画像解析した結果得られた粒径分布を図5に示す。また、撮影した粒子の直径と画像に存在する粒子の縦横比の関係を図6に示す。直流電圧15kV印加時の静電噴霧の粒

径分布は、100μm以下のサイズの粒子が見られないが、これは、拡大画像で撮影しきれないほど小さい粒子が存在したためであると考えられる。100~150μmの粒子は比較的多く存在していることがわかる。150μm以降の粒子群は直径が多くなればなるほど数は減少する傾向にあると考えられる。また、平均粒径 D_{median} は147.1μmであった。粒子のアスペクト比が2以上の粒子は比較的少ないことから、細管下流15mmの領域では液糸が分裂した液滴が多く存在していることが見受けられる。

5 結言

含水率20%O/W型ノルマルヘキサデカン/水エマルジョン燃料の静電噴霧を形成し、微粒化機構および特性に及ぼす影響を実験的に調査した結果、以下の知見を得た。

1. 高粘度エマルジョン燃料に9kVから18kVの高電圧を印加した結果、コーンジェットモードの静電噴霧を形成した。
2. 電極サイズを変化させた結果、サイズが大きくなるにつれて、形成された液糸のスピン周波数が増加した。
3. 静電噴霧にかかる電界強度を増加させると、電気力が慣性力を上回る閾値があることがわかった。
4. 粒子の拡大画像から噴霧の粒径分布および平均粒径を算出し、粒子が比較的微粒化され、球形であることを示した。

「参考文献」

- 1) 日本液体微粒化学会 アトマイゼーション・テクノロジー 微粒化の基礎と基本用語辞典 (2001)
- 2) 大盛 清, 今村 宰, 秋濱 一弘, 山崎 博司, エマルジョン燃料を用いた静電微粒化に関する基礎研究, 微粒化シンポジウム講演論文集(2015) p45-49
- 3) 貞本翔平, アルコール水溶液/重油エマルジョン燃料の燃焼特性に及ぼすアルコール種類および濃度の影響 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 (2012) p. 95-96
- 4) 森 康夫, 土方 邦夫, 長崎 孝夫, 静電均一微粒化の基礎的研究, 日本機械学会論文 集 . B 編 47(421), 1881-1890, 1981-09-25
- 5) 安居院 猛, 中嶋 正之, 流体の静電微粒化に関する粘性の影響について, 電子情報通信学会論文誌C Vol.J62-C No.1 pp.55-61