

論 文

電歪素子を用いた微小液滴生成機構^{*1}有川真明^{*2}, 伊藤修三^{*3}, 千田二郎^{*3}, 藤本 元^{*3}MECHANISM OF SMALL DROPLET GENERATION BY
MEANS OF PIEZO ACTUATOR

Masaaki ARIKAWA, Shuuzo ITO, Jiro SENDA, Hajime FUJIMOTO

For the fundamental clarification of the interaction between droplets and their combustion phenomena, it is need to investigate the characteristics of the array and the matrix of them. A system of small droplet generation by means of a piezo actuator was produced to realize them. It can produce droplets of almost the same size and control the droplet velocity, the distance between droplets. The flight distance, the initial velocity and the diameter of droplet were measured on photographs taken by the transmitted light in the experiments. As a result, the repeatability of droplet generation by use of this system is enough to measure its velocity and diameter. The droplet velocity is proportionally to the applied voltage of the system, and the droplet diameter is about $50[\mu\text{m}]$, independent on the change of the applied voltage and the input pulse width. The pulse width and frequency affect the stability of droplet generation.

Key Words : Small Droplet, Piezo Actuator, Mean Droplet Diameter, Droplet Velocity

1. はじめに

実際のディーゼル噴霧を用いた燃焼実験では、単位体積を通過する液滴数と液滴速度が大きく、かつ液滴間の相互干渉があるため、現象が極めて複雑になり、一般的には解析が非常に困難である。このため Fig. 1 に示すような単純化が考えられる。単一液滴の燃焼実験はこれまでに数多く行われて

きたが⁽¹⁾, 対象となる液滴径は $1[\text{mm}]$ 前後が主流であり⁽²⁾, 実際の噴霧を構成するような $100[\mu\text{m}]$ 程度以下の微小液滴を対象とした研究例は数少ない⁽³⁾. また、噴霧燃焼で

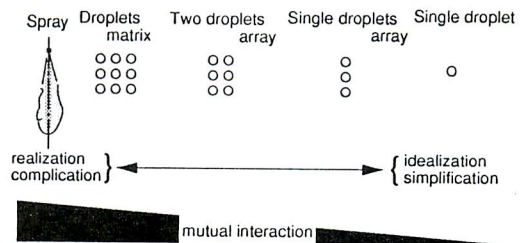


Fig.1 Simplification of spray phenomenon

* 1 1995年2月10日原稿受付
* 2 同志社大学大学院
* 3 同志社大学工学部
Ⓒ610-03 京都府綴喜郡田辺町多々羅都谷1-3
T E L 0774-65-6404

は液滴間の干渉効果の影響により単一液滴とは異なった燃焼形態になる⁽⁴⁾。そのため単一液滴の実験結果を噴霧のモデル化に直接適用するのは困難であると考えられる。

そこで、本研究では従来には得られなかった粒径が50 [μm] 以下の微小液滴が生成可能であり、液滴速度、液滴間距離を独立に制御可能である微小液滴生成装置を電歪素子 (PZT) を用いて作製し、その液滴生成機構を解明することを目的とした。

2. 実験装置および実験方法

2. 1 液滴生成原理

微小液滴の生成には、一般にプリンタに使用されるインクジェットシステムを実験用に改良したものをを用いた。Fig.2にこのシステムのノズル部の断面図を示す。ノズル部の主な構成部品は、ノズル (径φ35 [μm])、毛細管、圧力室、振動板 (ニッコーシプロダクツ, NIK # 3-B) および電歪素子 (住友金属, ピエゾ素子, SPEM-H5C) である。Fig.2-(a)は毛細管から圧力室への燃料供給開始時の平衡状態である。電歪素子に電圧を印加すると圧電効果によりこれに歪が発生し、振動板が圧力室側に湾曲した(b)の状態になる。この湾曲による圧力室の体積の減少分だけ燃料がノズルから押し出される。(c)に示すように、印加された電圧が低下し、再び毛細管より燃料が供給されると(a)の平衡状態に戻る。本研究では、試料としてn-トリデカン(粘度 1.878×10^{-3} [n · s/m²], 表面張力 26.13×10^{-3} [N/m] : 293 [K]) を用いた。ノズル径は、φ35 [μm] で非常に小さいので、不純物による詰まりを避けるため、フィルタ (ミ

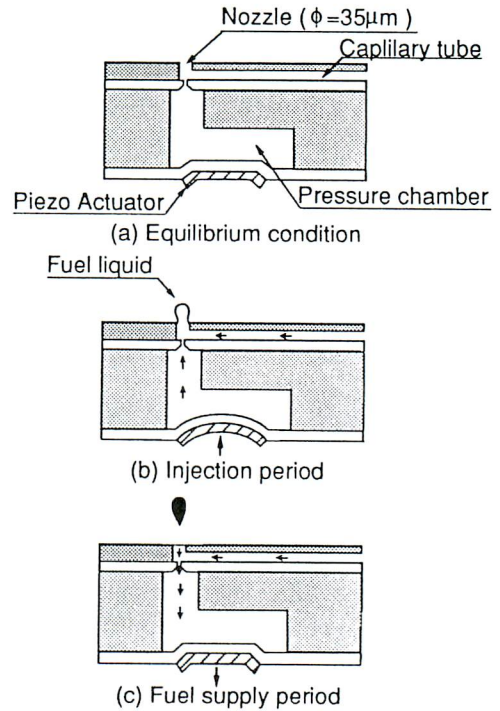


Fig.2 Mechanism of the injection head

リポア社製, 孔径0.45 [μm]) で供試燃料を濾過した。

本実験装置は、微小液滴を用いるあらゆる実験研究に対応させるため、液滴を鉛直上向き、下向き、あるいは水平方向に噴射可能であるが、本研究の実験では液滴を鉛直上向きに噴射する実験を行った。

2. 2 液滴飛翔距離、液滴初速度の測定

Fig.3に実験装置の撮影光学系の概略を示す。本実験では、液滴を鉛直上向きに噴射し、自由飛翔する液滴の再現性を調べるために飛翔液滴の頂点付近を観察し、液滴飛翔距離を70回サンプリングした。光源としてハロゲンランプを用い、拡散板により均一光とし高速度ビデオカメラ (KODAK EKTAPRO EM 1012, 500 [f.p.s.]) による

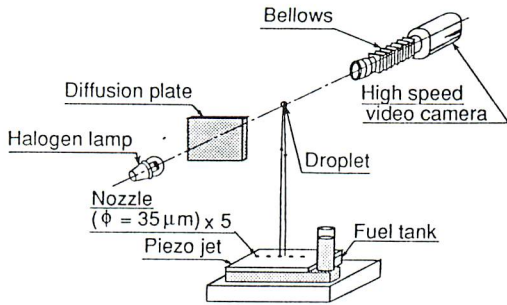


Fig.3 Optical measurement system

透過光撮影を行った。最終拡大倍率は、50倍とした。

飛翔距離の測定と同様の光学系を用い、撮影コマ数4500 [f.p.s.] で、ノズル近傍に焦点を合わせ、噴射直後の液滴の観察を行った。印加電圧を150~250 [V] の範囲で25 [V] 刻みに変化させ、噴射された液滴が最初に確認された画面とその次の画面の液滴移動距離から初速度を算出した。液滴噴出速度は10回の噴射の平均速度をその印加電圧での初速度とした。

2. 3 液滴の分裂挙動観察

前節の実験と同様、光源としてハロゲンランプを用い、高速度ビデオカメラの撮影速度を27000 [f. p. s.] とし、液滴の分裂挙動を観察した。焦点をノズル出口にあわせ、一回の噴射を時系列で37 [μ sec.] 毎に撮影した。より鮮明な画像を得るために、高速度ビデオカメラのモニタ画面に35mmスチルカメラ(フィルム; NEOPAN 400)で撮影した。最終焼付け倍率は28倍である。印加電圧は150~250 [V] まで25 [V] 刻みで変化させ、噴射された液滴の分裂形態の違いについて調べた。一回の噴射で燃料は多数に分裂する場合がある。その際の主滴と余滴の粒径および粒数を測定した。さらに、

撮影された液滴像から一回当たりの噴射量を概算し、印加電圧による噴射量の変化を調べた。

2. 4 スチルカメラによる液滴径の測定

光源にマイクロフラッシュ(菅原製作所、本体: MS 230 A, ランプ: ML 230 A, 閃光時間8 [μ sec.])を用い、実体顕微鏡(対物1.5倍、接眼20倍)の焦点を飛翔液滴の頂点付近に合わせ、6×9スチルカメラ(フィルム: NEOPAN 400)のシャッタを開放とし、マイクロフラッシュの単一閃光により連続噴射液滴(周波数1000 [Hz])の透過光瞬間撮影を行った。印加電圧、パルス幅、周波数を同時に変化させ、これらのパラメータが液滴生成に及ぼす影響について調べた。それぞれの実験条件で撮影した写真をさらに拡大焼付けし、焦点が適正な液滴を任意に10個選び、液滴径を測定した。また拡大倍率は膜面上で33倍であり、最終倍率54倍で焼き付けた。

3. 実験結果

3. 1 液滴飛翔距離の再現性

実験条件を印加電圧150 [V], 入力パルス幅8 [μ sec.], 周波数1000 [Hz] とし、70回連続噴射したときの自由飛翔液滴の透過光撮影結果の一例を、Fig. 4に示す。噴射された液滴は、飛翔軌跡の頂点に達するまでは重量と空気抵抗によって減速され、頂点で速度が0になる。その後、重力により鉛直下向きに加速されるが、空気抵抗のために直ちに加速度が小さくなって終端速度に達し、等速運動する。これらの撮影結果より液滴飛翔距離を求め、その度数分布を、Fig. 5に示す。平均飛翔距離は25.1 [mm]

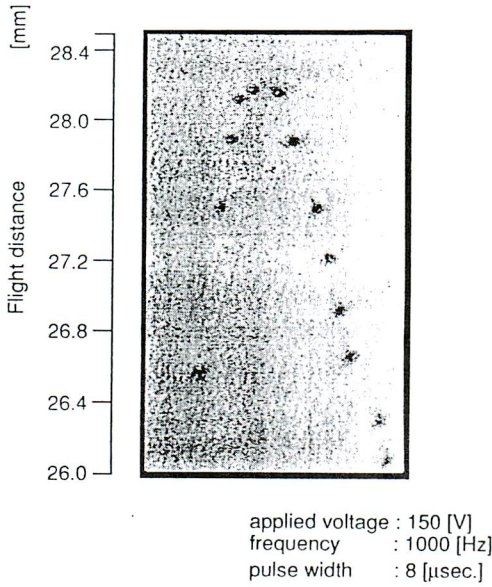


Fig.4 Example of droplet trajectory

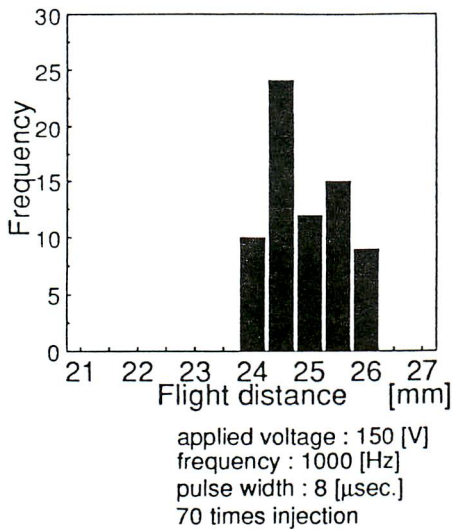


Fig.5 Frequency distribution of flight distance

である。最終拡大倍率は50倍であり、測定の結果、高速度ビデオカメラの視野内(3.3mm×2.8mm)に全ての液滴を捕らえることが可能

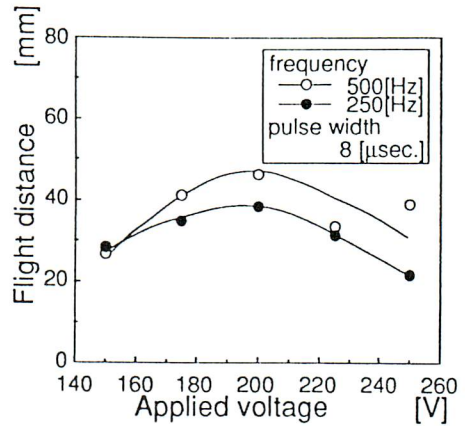


Fig.6 Relation between flight distance of droplet and applied voltage

である。従って、本実験装置は、液滴径や液滴速度の測定、さらには燃焼実験の観察に必要な再現性を十分に持つ。

3. 2 印加電圧と液滴飛翔距離の関係

Fig. 6に印加電圧を150～250〔V〕まで25〔V〕毎に変化させた場合の液滴飛翔距離を示す。実験条件は、入力パルス幅8〔μsec.〕、周波数は250, 500〔Hz〕である。それぞれの場合において飛翔距離を10回測定し、その平均値を図示した。印加電圧が200〔V〕に達するまでは飛翔距離は増加し、最大平均飛翔距離は46.2〔mm〕である。しかし、200〔V〕以上になると飛翔距離は減少する傾向にある。印加電圧が高くなると電歪素子の歪量も大となり、液滴飛翔距離は増加すると推測される。しかし、実際にはこの電歪素子が与える噴射圧力は、初期の150～200〔V〕までは液滴を押し出す力に使われ、200〔V〕以上では、その噴射圧力が燃料の表面張力に比べ大きすぎるため、そのエネルギーは液滴の分裂に使われる。したがって、200〔V〕付近では、液滴

が分裂する際には、飛翔距離は減少し、分裂しない場合は飛翔距離は増加する。

3. 3 印加電圧と液滴初速度の関係

入力パルス幅8 [μ sec.], 周波数500 [Hz] で一定とし、印加電圧を150~250 [V] まで25 [V] 刻みで変化させたときの液滴初速度と印加電圧の関係を、Fig. 7に示す。各電圧での初速度は測定回数10回の平均値である。この段階では、噴射燃料はまだ分裂しておらず、液柱状の燃料液滴の速度を測定しているため、初速度は印加電圧に比例して増加する。すなわち本装置では、液滴が電歪素子の歪みによる圧力室の体積減少分がノズルから噴射されるので、印加電圧が高いほど電歪素子の歪みによる圧力室の体積減少が大になり、そのため液滴の初速度および噴射量が増加する。

3. 4 液滴の分裂挙動観察

ノズル近傍に高速度ビデオカメラの焦点を合わせ、印加電圧を150 [V] ~250 [V] の範囲で25 [V] 刻みで変化させた場合の噴射液滴の分裂過程を観察した。ここで、最も液滴径の大きい液滴を主滴、その他のものを余滴と定義した。Fig. 8に、その撮影結果から測定した主滴と余滴の粒径、分裂数を示す。150, 175 [V] においては、液滴は分裂せずに生成されるが、200, 225 [V] では2つに、250 [V] では、5つに分裂する。これは、印加電圧の増加に伴い、電歪素子によって与えられる噴射圧力が大きくなり、さらに平衡状態に戻る際の吸い戻しの効果により液滴の表面張力を上回り、燃料が引きちぎられるためである。主滴の液滴径は、各印加電圧でほぼ一定であり、電圧変化による噴射量の増加分は余

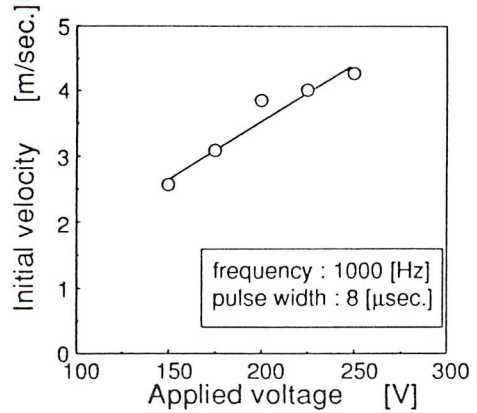


Fig.7 Initial velocity as a function of applied voltage

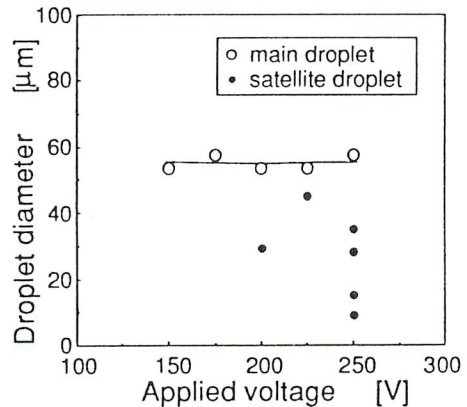


Fig.8 Relation between applied voltage and main and satellite droplet sizes

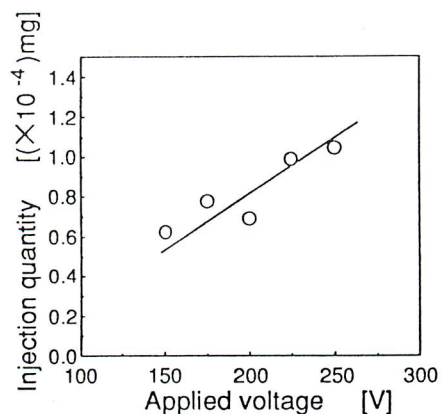


Fig.9 Relation between applied voltage and injection quantity

滴の粒径および、余滴数の増加として使われる。また、印加電圧と噴射量の概算値の関係を Fig .9に示す。印加電圧が大になると、上述の理由により噴射量は増加する。

3. 5 印加電圧，入力パルス幅と液滴径の関係

Fig .10にパルス幅8 [μsec .] で，印加電圧を変化させた場合の自由飛翔液滴の撮影結果の一例を示す。入力周波数を1000 [Hz] 一定とし，印加電圧を150~250 [V] まで25 [V] 刻みで変化させ，パルス幅を4, 8, 12, 16 [μsec .] とした場合の液滴径の測定結果およびその標準偏差を，Fig .11に示す。パルス幅，印加電圧が変化しても，液滴径に大差は見られない。液滴の分裂を考慮すると，印加電圧の増加に伴って，電歪素子の歪みが大きくかつ速いため，噴射量は多くなり，液滴径は大になることが予想

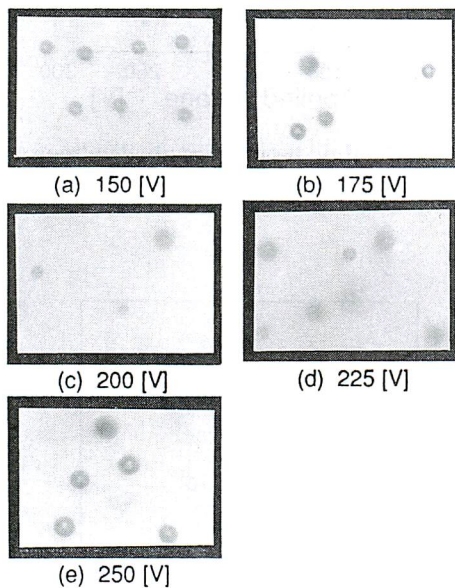


Fig.10 Droplet photographs in change of applied voltage (8 [μsec .] , 1000 [Hz])

されるが，実際には噴射量の増加分だけ余滴が生成される。入力パルス幅が変化しても液滴径に大差は見られないが，8 [μsec .] の場合は印加電圧の増加に伴い，液滴径は大になり，分裂数は少ないと考えられる。

その他のパルス幅の場合は，印加電圧が増加すると液滴径は減少する傾向にあり，複数個の液滴に分裂すると考えられる。各パルス幅での標準偏差は8および12 [μsec .] の時が最も小さくなる傾向があり，パルス幅が4 [μsec .] の場合は，電歪素子が一定歪量に達するまでに印加電圧が下がるために歪みが小さくなるので，液滴の生成はきわめて不安定になり，噴射しない状態になり易い。この範囲では液滴生成が安定する。パルス幅が16 [μsec .] になると，平均粒径は50 [μm] 前後であるがばらつきが大きい。すなわち電圧の印加時間が長いため，これが次の噴射のための燃料供給に影響すると考えられる。以上の結果より，パルス幅を8 [μsec .] 前後で用いれば安定して液滴が生成される。

3. 6 液滴径の入力周波数依存性

入力パルス幅を8 [μsec .] に固定し，入力周波数すなわち噴射間隔を500, 1000, 1500, 2000 [Hz] と変化させ，連続噴射したときの液滴径の測定結果と，その標準偏差を Fig .12に示す。噴射間隔の変化にもかかわらず液滴径に大差は見られないが，500, 1000 [Hz] の場合は液滴径が安定する。この傾向は，噴射間隔が長くなると，液滴噴出時に生じるノズル上部の燃料液膜の振動が次の噴射までに減衰し，その影響が少なくなるためと考えられる。しかし，噴射間隔が短くなるとノズル上部の燃料液膜の振

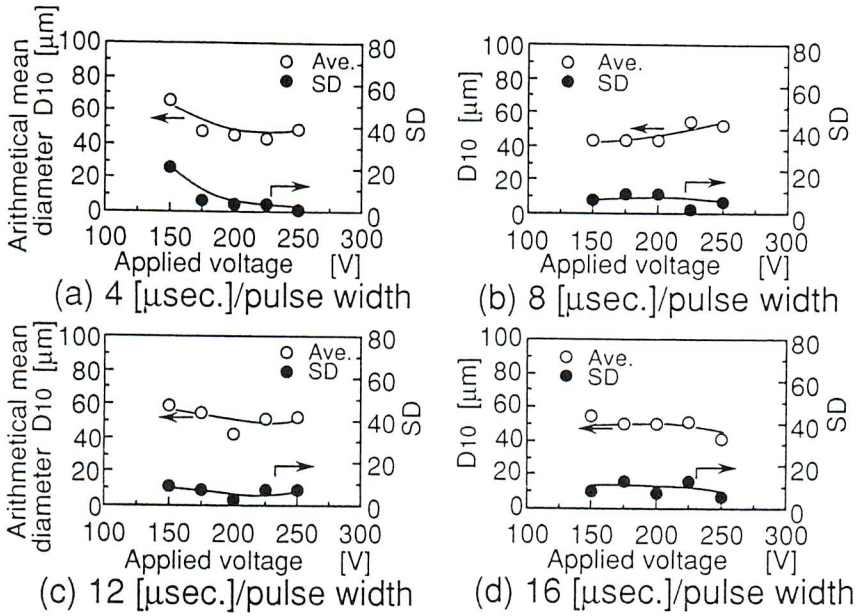


Fig.11 Relation between arithmetical mean droplet diameter and applied voltage as function of pulse width (input frequency 1000 [Hz])

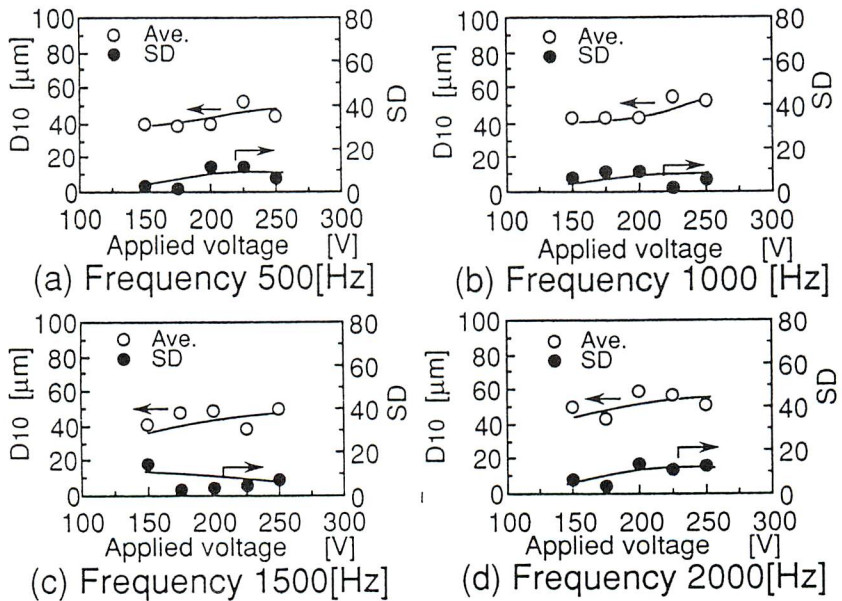


Fig.12 Relation between arithmetical mean droplet diameter and applied voltage as function of input frequency (pulse width 8 [μ sec.])

動が十分減衰せず、次の噴射に影響を及ぼすと考えられる。

以上より、燃焼実験を行う際には、入力周波数は1000[Hz]前後にする必要がある。

5. 結言

本研究では、任意の液滴径、液滴速度、液滴間距離を独立に制御できる微小液滴生成装置を電歪素子を用いて作成し、微小液滴の生成機構を明らかにするため種々の条件で実験を行い、本研究の実験範囲で以下のような結論が得られた。

- (1) 印加電圧、パルス幅、周波数を任意の値に設定した場合の液滴生成の再現性は十分である。したがって、燃焼実験等にも応用し得る。
- (2) 印加電圧を変化させた場合、単一液滴の生成領域では、印加電圧に比例して液滴飛翔距離は増加するが、液滴が分裂して生成される領域に入ると、飛翔距離は減少する傾向にある。
- (3) 液滴初速度は印加電圧の増加とともに速くなり、本実験条件の測定においては2.6~4.3[m/s]の範囲にある。
- (4) 本実験装置では、一回の噴射において単一液滴と複数液滴の生成領域に区分される。印加電圧が高くなると噴射量は比例的に多くなり、印加電圧200[V]付近

でこの二領域の遷移点があると考えられる。

- (5) 印加電圧、入力パルス幅が変化しても、主滴の液滴径はほぼ50[μm]で、一定である。また、パルス幅が8および12[μsec .]の場合は液滴生成は安定するが、4および16[μsec .]の場合は液滴径にばらつきが生じる。
- (6) 周波数を変化させた場合、液滴径は大きく変わらないが、500ないし1000[Hz]に比べ、1500および2000[Hz]の場合は、ばらつきが大きい。

参考文献

- (1) 例えば、熊谷清一郎、機械の研究4-6、(1952)、165.
- (2) 小林清志、液粒の蒸発および燃焼に関する研究(第1~3報)、日本機械学会論文集(第2部)、20-100、(1954)、826-837.
- (3) 佐藤 豪ほか、第9回液体の微粒化に関する講演会論文集、(1981)、107.
- (4) 辻 正一、燃焼機器工学、日刊工業新聞社、(東京)、(1971)、65.

謝 辞

本研究に遂行にあたり、本学4回生の山崎健一君、小野泰右君の助力を得たこと、また実験装置の製作にあたり御協力頂いたシャープ(株)、ニッコーシ(株)に謝意を表す。