

論文

円筒型電歪素子を用いた微小液滴の生成に関する研究*1

鄭 性 植*2, 徳 岡 直 静*3

STUDY ON GENERATION OF FINE DROPS
BY CYLINDRICAL PIEZO-ELECTRIC TRANSDUCER

Sung-Sik CHUNG and Naochika TOKUOKA

For a study of evaporation, ignition and combustion of liquid fuel drops, a small and slim drop generator is required to prevent from disturbing a flow and also to have abilities to change drop diameter, drop velocity and drop space independently.

For those requirements, a gould type nozzle using a cylindrical piezo-electric transducer has developed and examined its characteristics. Tested sampled have kinetic viscosity of 0.9 to $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ and a surface tension of 27 to 79 N/m . Drop size and its velocity can be controlled by changing a rise time t_r and peak voltage of impressed signal. The lower and upper limits of impressed voltage increase with the increase of kinetic viscosity. A decrease of surface tension affects slightly on a decrease of lower limit but largely on a decrease of upper limit.

Key Words: Mono-dispersed Drop, Single Drop, Piezo-electric Transducer, Gould Type

1. はじめに

噴霧燃焼では、微粒化された液体燃料が空間に広がり、蒸発・拡散して周囲気流と混合気を形成し着火・燃焼に至る。蒸発や着火の現象は、燃料や周囲気流の温度や物性、気流との相対速度などの影響を大きく受けることは明らかである。噴霧を構成する様な数 $100\mu\text{m}$ 以下の液滴の蒸発・着火過程に及ぼす周囲気流の物性や気流との相対速度の影響を明らかに

することは、噴霧燃焼を考える上で重要である。

液滴の蒸発や着火に関する研究は、従来より数多くなされてきたがこれらの殆どは懸垂法によるもので、液滴径も大きく、噴霧燃焼場に近しい数 $100\mu\text{m}$ 以下の液滴を扱った例¹⁾は、殆ど見当たらない。

この主な理由は、数 $100\mu\text{m}$ 以下の粒径の液滴を任意に発生できる装置がないことや測定上の困難さに起因する。

著者らは、高温場での噴霧の蒸発や着火過程を明らかにする目的から単一の微小液滴の蒸発・着火過程の解明を目指してきた。この様な研究を行う上で、任意の直径や速度をもった液滴を生成できる装置を開発する必要が生じ、その試作を試みた。

*1 平成6年5月10日原稿受付

*2 東亜大学校工科大学機械工学科講師
韓国釜山市沙下区下端洞840

Tel. 051-200-7635, Fax. 051-200-7656

*3 慶応義塾大学理工学部機械工学科助教授
〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

Tel. 045-563-1141, Fax. 045-563-5943

本研究で試作した装置は、円筒型の電歪素子を用いたグルド型ノズルである。グルド型ノズルに関する研究は、Carnahanら²⁾や都築ら³⁾により僅かに報告されているが、これらはインクジェットプリンターのノズルの改良を目指した研究であり、微粒化機構にまで言及されていない。また、グルド型ノズルの基本特性および微粒化機構については朴木ら⁴⁾により報告されている。本報では、蒸発・着火研究を目的とした小型ノズルを開発し、その特性と試料物性の影響を明らかにした。

2. 液滴発生装置

2. 1 蒸発・着火測定装置

著者らは、高温・高圧場における微小液滴の蒸発や着火過程の解明を目標としている。本研究で用いる蒸発・着火測定装置を図1に示す。本装置は、加圧された空気あるいは組成を調整された気体を導入し、測定部上流に設けられた加熱部で所定の温度まで加熱し、整流部を通過して測定流路に導く構造になっている。液滴は、整流部中央に設けられた液滴発生装置により生成され、A部より流れに平行に導入される。液滴の蒸発や着火過程は、測定部側面に設けられた観測窓を通して写真撮影や速度測定を行なう。蒸発速度は、流れに沿った液滴の粒径変化とLDVにより測定した粒子速度より算出する。測定は、測定部の外壁に設けられた軸方向300mmで幅10mmの観測窓を通して行った。

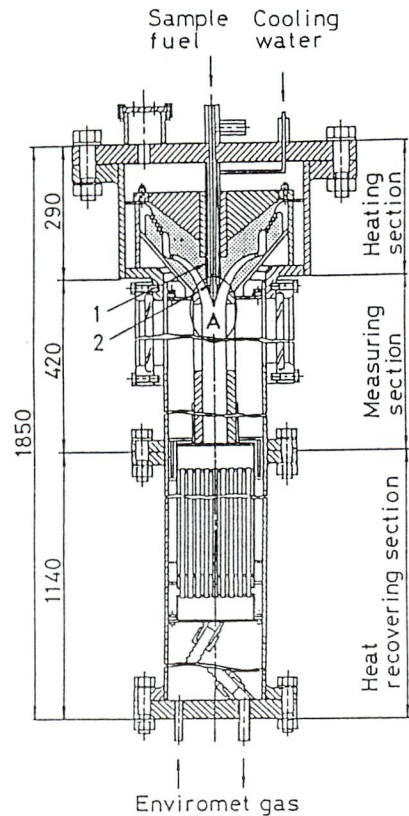


Fig. 1 Apparatus for Evaporation and Ignition Measurement

2. 2 液滴発生装置の設計目標

微小液滴の蒸発・着火過程を2.1で述べた方法により観測するために液滴発生装置に要求される条件は以下の通りである。

- (1) 流れを乱さないために装置の直径が小さいこと。
- (2) 生成できる液滴の直径が200 μ m以下で任意に変化できること。
- (3) 液滴間距離を任意に選べること。
- (4) 生成される粒径がばらつかないこと。
- (5) 液滴速度を任意に変化できること。

2. 3 液滴発生装置の構造

単滴および液滴列を発生する方法として、円盤型の電歪素子を用いたステンメ型ノズルや振動微粒化法と電気偏向法を組み合わせたノズルや静電微粒化法など何種類かのノズルを試作したが、何れも大きさや取扱上に問題があり、最終的に円筒型の電歪素子を用いたグルド型ノズルを用いることとした。図2に本研究で試作した液滴発生装置を示す。

本装置は、外径7mm、長さ50mmの黄銅製円筒の中に、外径1.7mm、内径1.1mm、長さ12.7mmの円筒型電歪素子とその先端にオリフィスがばねと袋ナットで固定された簡単な構造である。オリフィス径を変化することにより、得られる液滴径の範囲を変えることができる。電歪素子は、ジルコンチタン酸鉛系の磁器で、円筒の内面が負、外面が正の電極になっており、電界を付加することにより半径方向に変形する。

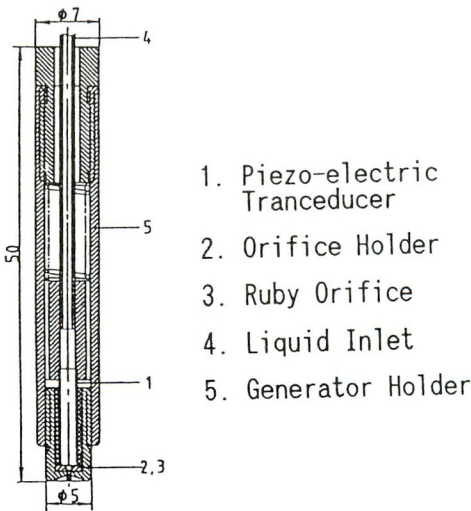


Fig. 2 Drop Generator

3. 実験装置と実験方法

3. 1 実験装置と実験方法

本実験で用いた実験装置系統図を図3に示す。装置は大別して、(1)試料供給、(2)液滴発生装置、(3)印加電圧制御系、(4)写真撮影の4系統から成る。

サブタンク①に蓄えられた試料は、加圧空気によりフィルター(濾過精度 1 μ m)を通りメインタンクに送られる。メインタンクは、鉛直方向に微動できる台上に置かれており、これを調整することにより試料は一定の水頭差で液滴発生装置に供給される。また、サブタンク②は、電歪素子内に気泡が残留することを防ぐために、濾過された試料を加圧空気で圧送するためのものである。また、蒸発および着火の実験では高圧場で液滴を生成する必要がある。この場合には、図のメインタンクの矢印部と高圧場をつなぐことにより背圧を変化し、液滴発生装置と実験場の差圧を一定の水頭差に保つことができる。

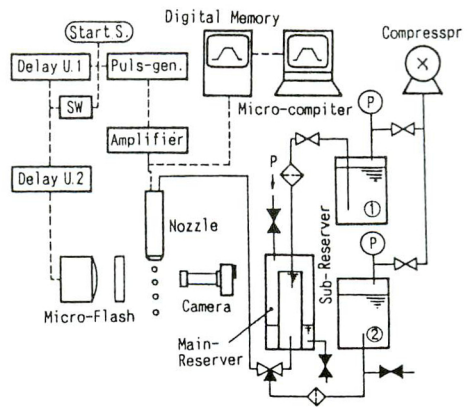


Fig. 3 Diagram of Facilities

2. 3 液滴発生装置の構造

単滴および液滴列を発生する方法として、円盤型の電歪素子を用いたステンメ型ノズルや振動微粒化法と電気偏向法を組み合わせたノズルや静電微粒化法など何種類かのノズルを試作したが、何れも大きさや取扱上に問題があり、最終的に円筒型の電歪素子を用いたグルド型ノズルを用いることとした。図2に本研究で試作した液滴発生装置を示す。

本装置は、外径7mm、長さ50mmの黄銅製円筒の中に、外径1.7mm、内径1.1mm、長さ12.7mmの円筒型電歪素子とその先端にオリフィスがばねと袋ナットで固定された簡単な構造である。オリフィス径を変化することにより、得られる液滴径の範囲を変えることができる。電歪素子は、ジルコンチタン酸鉛系の磁器で、円筒の内面が負、外面が正の電極になっており、電界を付加することにより半径方向に変形する。

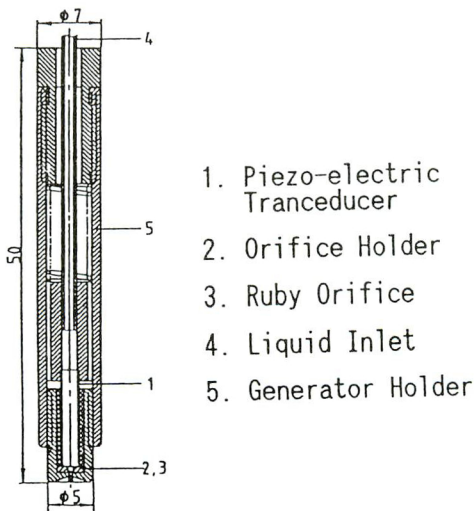


Fig. 2 Drop Generator

3. 実験装置と実験方法

3. 1 実験装置と実験方法

本実験で用いた実験装置系統図を図3に示す。装置は大別して、(1)試料供給、(2)液滴発生装置、(3)印加電圧制御系、(4)写真撮影の4系統から成る。

サブタンク①に蓄えられた試料は、加圧空気によりフィルター(濾過精度 1 μ m)を通りメインタンクに送られる。メインタンクは、鉛直方向に微動できる台上に置かれており、これを調整することにより試料は一定の水頭差で液滴発生装置に供給される。また、サブタンク②は、電歪素子内に気泡が残留することを防ぐために、濾過された試料を加圧空気で圧送するためのものである。また、蒸発および着火の実験では高圧場で液滴を生成する必要がある。この場合には、図のメインタンクの矢印部と高圧場をつなぐことにより背圧を変化し、液滴発生装置と実験場の差圧を一定の水頭差に保つことができる。

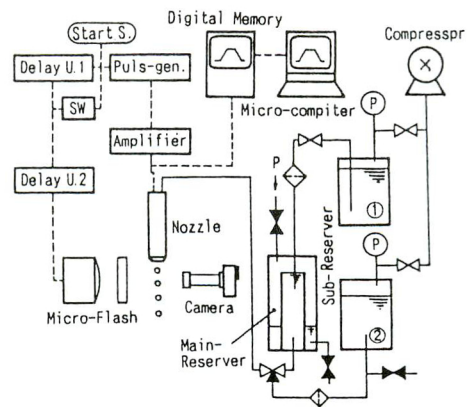


Fig. 3 Diagram of Facilities

液滴を生成する場合、スタート信号は分岐され、一方はパルス発生装置に送られ、その出力信号を増幅器を介して液滴発生装置の電歪素子に印加する。また、他方は遅延回路1,2を通り一定時間遅れてマイクロフラッシュを作動させる。生成される液滴径を測定する場合は遅延回路2の遅延時間を0とし、マイクロフラッシュの発光遅れは遅延回路1のみで行った。遅延回路2は、生成周期の実験やオリフィス先端のメニスカスの運動を観察する場合など一定間隔で液滴を2回発生させる必要がある時に用いるが本報告の範囲では使用していない。

電歪素子に印加した電気信号の波形は、デジタルメモリーにより逐次観察し、必要の場合にはコンピュータで記録した。

粒径測定には、直接写真法を用いた。フィルム面上で約30倍に拡大撮影し、座標読取装置上で最終倍率約400倍に拡大投影し、粒径を測定した。オリフィスから噴射される液滴は、僅かに振動しており、液滴の飛行方向を軸とする回転楕円体と成る。したがって、飛行方向とこれに直行する2方向の径を測定し、相当直径を求めた。また、予備実験で約100個の液滴の標準偏差を求めた結果、いずれも5%以下であることを確認し、これより真値との差を±5%以内、信頼度を95%で平均値を求めるために必要なサンプル数Nを算出した結果、 $N \geq 5$ となるが、各条件での分散を知るために測定回数は30回以上とした。

3. 2 印加する電気信号の波形

電歪素子に印加する電気信号の波形により、生成される液滴の特性は変化する。予備実験で波形の異なる電気信号を印加した場合に生成される液滴の直径および速度を測定した結果、台形波状の場合が粒径や速度を最も広い範囲で変化できることが明かとなった。したがって、本研究では、印加電気信号の波形を図4に示すような台形波状とした。

本実験では、波形の各部を以下に示す4つの数値で表し、これらを変化して電気信号波形の影響を調べた。

E: 印加電圧

印加電気信号の電圧のピーク値

t_r : 立上り時間

電圧がEの10%から90%までの時間

t_c : 定電圧時間

電圧がEの90%以上を保持する時間

t_f : 立下り時間

電圧がEの90%から10%までの時間

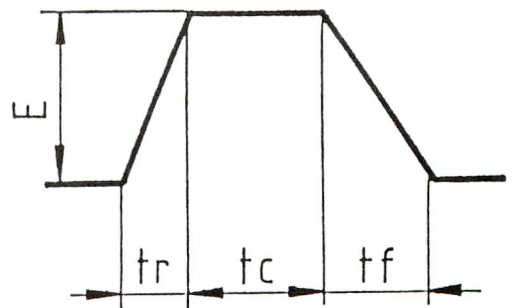


Fig. 4 Signal Pattern

3. 3 実験条件

本研究で行った実験の印加電気信号の特性を表1に、試料の物性を表2に示す。

Table 1 Characteristics of Impressed Signal

印加電圧 E	0~200 V
立上り時間 t_r	25~200 μs
定電圧時間 t_c	0~200 μs
立下り時間 t_f	25~200 μs

Table 2 Tested Samples and Their Properties

試料	密度 [kg/m^3]	表面張力 [$\times 10^{-3} \text{N/m}$]	動粘度 [$\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]
蒸留水	999	72.9	1.00
18%グリセリン水溶液	1040	72.5	1.57
28%グリセリン水溶液	1066	72.1	2.14
44%グリセリン水溶液	1109	71.2	4.01
53%グリセリン水溶液	1137	70.7	6.03
59%グリセリン水溶液	1150	72.2	8.92
62%グリセリン水溶液	1158	68.7	10.0
5%エタノール水溶液	989	57.1	1.24
20%エタノール水溶液	970	38.0	2.14
100%エタノール	789	22.9	1.47

4. 結果および考察

4. 1 液滴の生成形態

電歪素子の内壁と外壁の間に電圧を与えると、電歪素子は変形し、その変形速度に応じて内部に圧力波が発生する。オリフィス先端に圧力ピックアップを取り付けて測定した圧力変化の一例を図5に示す。この場合は、オリフィス先端に圧力ピックアップを取り付けて測定した結果であり、液体がオリフィスから流れ出る実際の場合とは異なる。電気信号を与えると圧力は急激に上昇し、ほぼ定電圧になる直前で最大値を示し、最大圧力は印加電圧 E にほぼ比例する。また、立上り時間 t_r を変化した実験結果によれば、

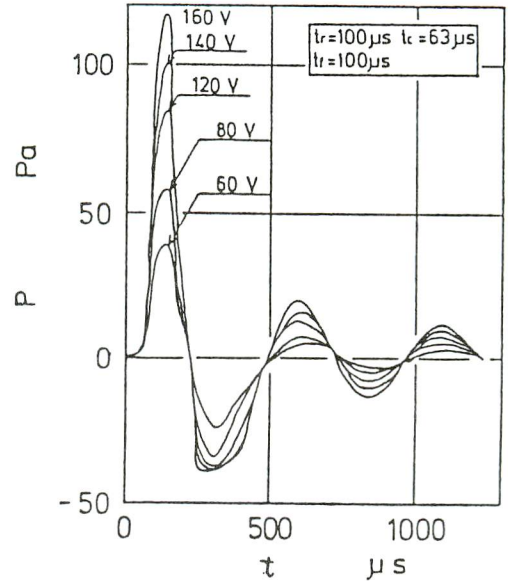


Fig. 5 Pressure at Orifice

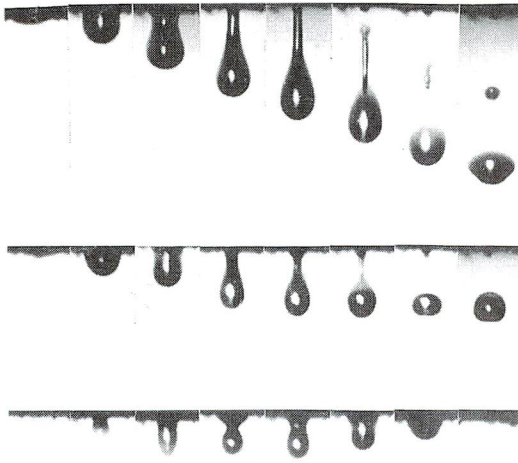
E が同じ場合 t_r が短いほど高くなる。

圧力波がオリフィス面に達するとオリフィスの内外の圧力差により試料が流れ、液滴を形成する。したがって、電歪素子に印加する電気信号の波形により形成される液滴の特性は変化する。

印加する電気信号の立上り時間 t_r 、定電圧時間 t_c および立下り時間 t_f を一定として、印加電圧 E のみを変化した場合、液滴の生成形態は図6に示す通り、(1) 複数液滴生成領域、(2) 単一液滴生成領域および(3) 非液滴生成領域の3つの領域に分類される⁴⁾。 E が高くその微分値 E' も大きい場合には複数液滴を発生するが、 E と E' の組み合わせにより複数液滴発生領域はさらに(1) 比較的大きな2滴が生成される場合、(2) 主滴と余滴が生成される場合、(3) 余滴が生成されるがすぐに主滴に吸収され単滴となる場合に分けられる。また、単一液滴が生成された場合の粒度分布の

一例を図7に示す。

複数液滴生成領域と単一液滴生成領域の境界では粒径の標準偏差は大きくなる



Non-drop Formation

Fig. 6 Drop Formation

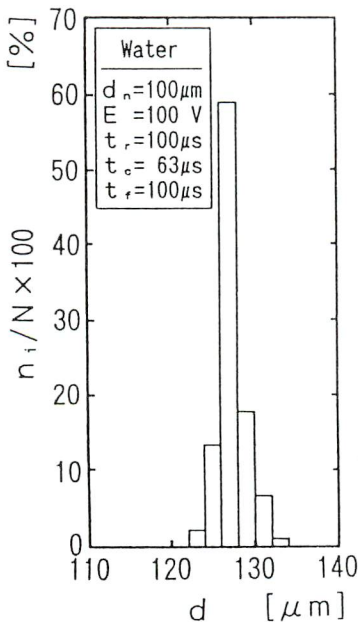


Fig. 7 Drop size Distribution

が、その境界を5%とした。その他の条件では、いずれの場合も±3%以下であった。

4. 2 信号波形の影響

図8に t_c および t_f を一定とし、立上り時間 t_r と印加電圧 E を変化した場合の液滴の生成領域を示す。単一液滴生成領域の印加電圧の上限付近では、オリフィス直後で一度主滴と余滴が生成されるがすぐに余滴が主滴に吸収される現象が見られる。図より、単一液滴生成領域の印加電圧 E の上限と下限は立上り時間 t_r に比例的に増加することが分かる。

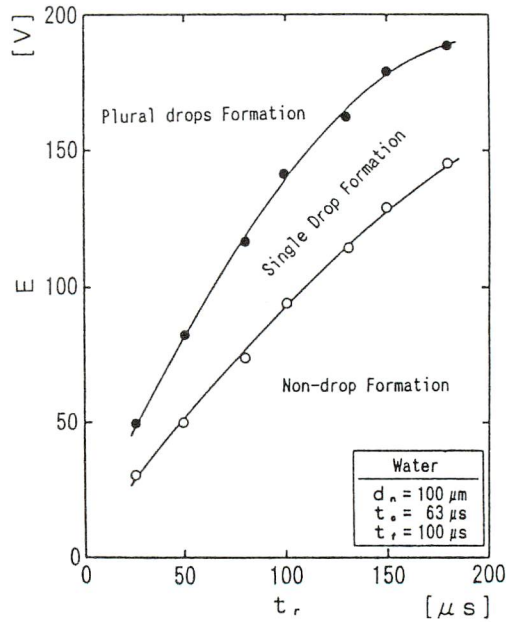


Fig. 8 Effect of Rise Time on Drop Formation

単一液滴生成領域内で、立上り時間 t_r を一定に保ち印加電圧 E を変化した場合に形成される液滴の粒径 d_{10} および液滴

速度 V_d の関係を図9に示す. t_r が一定であれば, 生成される液滴の V_d はほぼ d_{10} に比例して大きくなる. また, 参考のため印加電圧 E を一点鎖線で示した. この図からは明確ではないが, E を増加するとほぼ比例して V_d と d_{10} が増加し, E が一定の場合は t_r が短いほど d_{10} も V_d も大きくなる. したがって, t_r と E を適当に組み合わせることにより, 粒径と粒子速度を一定の範囲で任意に変化することが可能である. ただし, E は電歪素子の組み付け力やオリフィスの同軸度などに非常に大きく影響され, 絶対値は10Vの単位でずれる場合があるが, 一旦組み上げた装置では再現性もあり, 絶対値が変化し

た場合でもその傾向は図9と同様になる.

定電圧時間 t_c と立下り時間 t_f に関し, 同様の実験を行った結果, t_c が短い範囲では単一液滴を生成する印加電圧の範囲が低くなるが, いずれも d_{10} と V_d には殆ど影響を与えないことが分かった.

4. 3 オリフィス径の影響

オリフィス径 d_n が生成される液滴の特性に影響を与えることは容易に想像できる. 電気信号の波形を一定として d_n のみを変化した場合に形成される液滴の粒径 d_{10} および粒子速度 V_d と印加電圧 E の関係をそれぞれ図10, 図11に示す. 電気信号波形が同一であれば, d_n が小さい程, 圧力上昇率が高くなるため, 低い印加電圧で単一液滴の生成が可能になり生成される粒径も小さくなる. また, E が同じ場合には d_n が小さい程液滴速度は大きくなる.

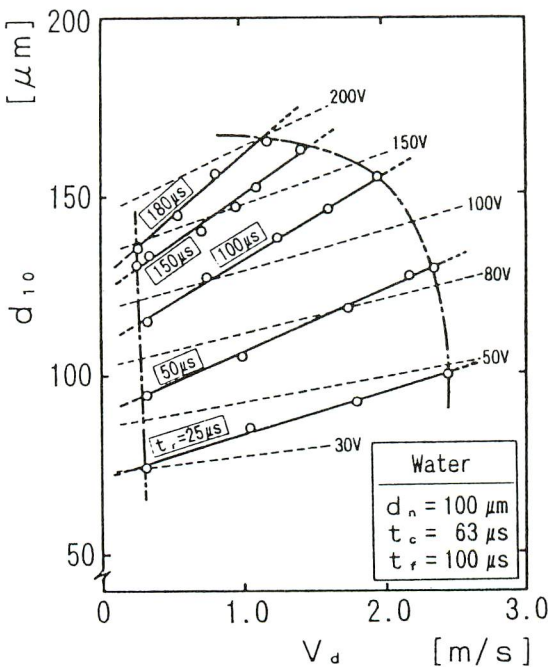


Fig. 9 Effect of Rise Time on Drop Size and Drop Velocity

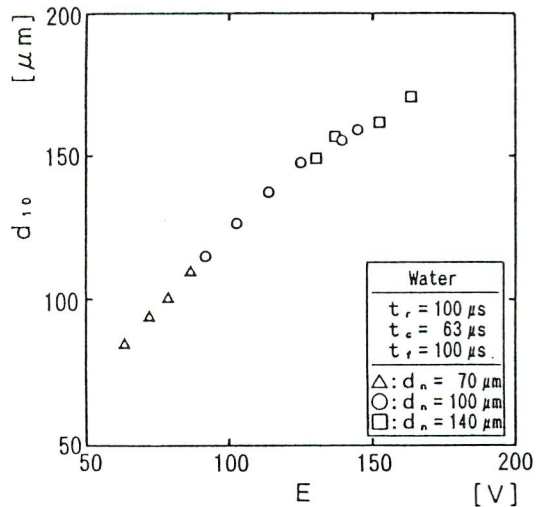


Fig. 10 Effect of Orifice Diameter on Drop Size

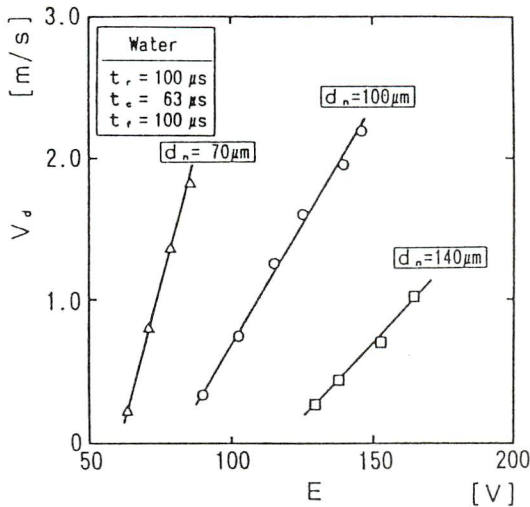


Fig. 11 Effect of Orifice Diameter on Drop Velocity

4. 4 試料物性の影響

4. 4. 1 粘性の影響

動粘度を変化した場合の単一液滴生成領域の上下の限界印加電圧を図12に、粒径 d_{10} と液滴速度 V_d の関係を図13に示す。試料の動粘度が増加するに従い、 E の下限も上限もほぼ比例的に増加し、形成される液滴の d_{10} も V_d も大きくなる。これは、動粘度が増加すると、電歪素子により発生した圧力波が減衰され、オリフィス部における圧力差が小さくなることと形成された液柱の変形が小さく分裂しにくくなるために単一液滴を発生するためにはより高い E が必要となるためである。また、立上り時間 t_r が長い場合には、 E の範囲が高くなり、生成される液滴の d_{10} と V_d も大きくなる。

4. 4. 2 表面張力の影響

表面張力 σ を変化した場合の単一液滴生成領域を図14に示す。 σ が減少すると、

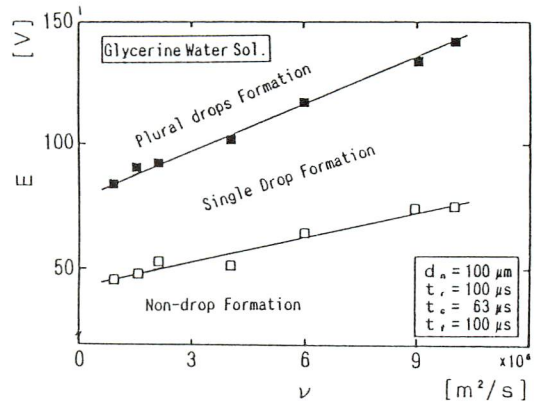


Fig. 12 Effect of Viscosity on Drop Formation

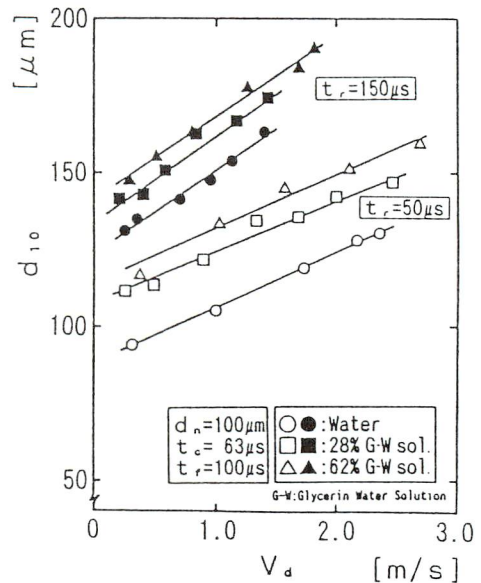


Fig. 13 Effect of Viscosity on Drop Size and Drop Velocity

単一液滴生成領域の限界印加電圧は下がり、特に上限の低下が著しい。したがって、上限と下限の電圧差が急激に小さくなる。これは、 σ が減少すると、表面エネルギーが減るため低い圧力差で液面が変形を始めるためと考えられる。また、微粒化し易くなるため比較的簡単に複数液

滴が生成されるため、上限が急激に低下するものと思われる。

本実験ではエタノール水溶液の濃度を変えて表面張力を変化させたため、表面張力と同時に動粘度も変化する。前述の動粘度の効果を考慮すると、 σ の変化のみの影響は図14よりも僅かに大きくなると考えられる。

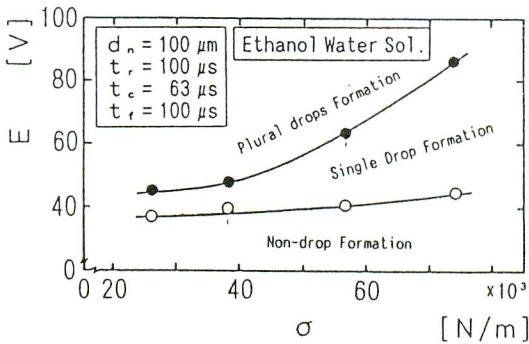


Fig. 14 Effect of Surface Tension on Drop Formation

図15に動粘度が同じで表面張力が異なる28%グリセリン水溶液と20%エタノール水溶液を用いた場合の単一液滴生成領域の違いを示す。動粘度は両者とも $2.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であるが、表面張力は前者が 72.1×10^3 に対し後者は $38.0 \times 10^3 \text{ N/m}$ である。図より、単一液滴生成領域の限界印加電圧は表面張力が低いエタノール水溶液の方が上限、下限とも低い値を示す。

また、図16に形成される液滴の d_{10} と V_d の関係を示す。表面張力が低い方が印加電圧も低いため、形成される液滴の d_{10} も V_d も小さな範囲になる。

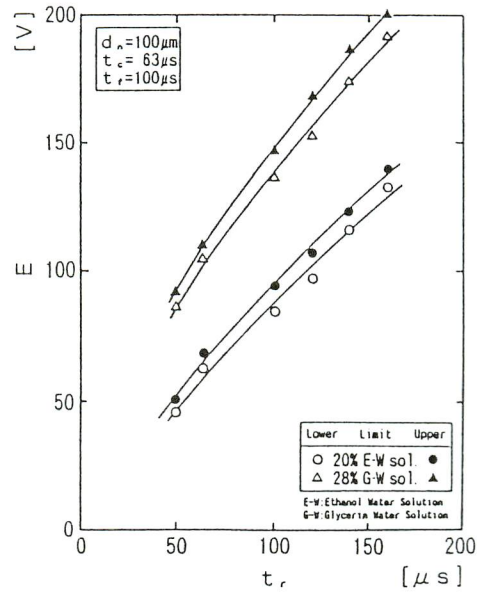


Fig. 15 Effect of Surface Tension and Rise Time on Drop Formation

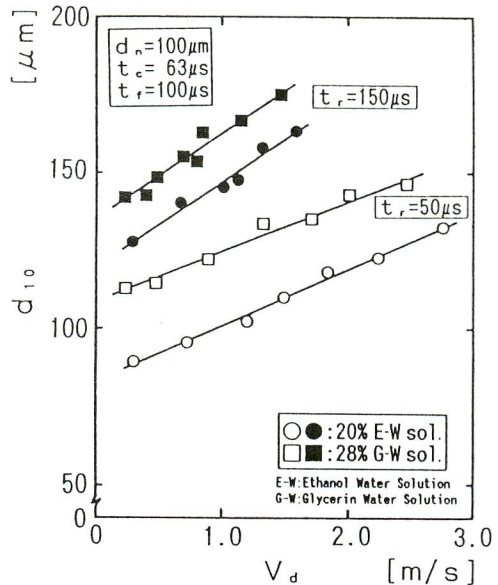


Fig. 16 Effect of Surface Tension on Drop Size and Drop Velocity

5. 結論

円筒型電歪素子を用いた単液生成装置を開発しその特性と試料物性の影響を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) 単液滴の生成には、電歪素子に印加する電気信号の立上り時間が大きく影響し、定電圧時間や立下り時間は殆ど影響を与えない。
- (2) 立上り時間が長い程、単液滴生成領域の下限および上限を示す印加電圧は高くなる。
- (3) 立ち上がり時間が一定の場合、印加電圧が高くなる程、生成される液滴の粒径および液滴速度は大きくなり、液滴速度は粒径にほぼ比例して増加する。
- (4) オリフィス径が大きい程、単液滴

生成領域の限界印加電圧は高くなる。

- (5) 粘性が高くなる程、単液滴生成領域の限界印加電圧は高くなる。
- (6) 表面張力が低くなる程、単液滴生成領域の限界印加電圧は低下する。特に上限の印加電圧が顕著に低下し、上下限の電圧差が小さくなる。

参考文献

- 1) 荒木信幸：機論，39-317 (昭48)，289.
- 2) CARNAHAN R., et al.: IEEE Trns. of Industry Applications, vol. IA-13, No. 1 (1977), 95.
- 3) 都築 他1: 電子通信学会総合全国大会前刷集, (昭56), 5-123.
- 4) 朴木 他3: 機論(B編), 51-471 (昭60), 3615.