

静電場における液滴形成に関する研究

千葉職業能力開発短期大学校 成田校 石橋 幸男
千葉職業能力開発短期大学校 千葉校 吉田 信也

A Study on Drop Formation in an Electrostatic Field

Yukio ISHIBASHI • Shinya YOSHIDA

要約

細管ノズルより流出する液体に高電圧を印加すると、細管先端において、液体は静電引力と表面張力の相互作用により微粒化する。この場合、適当な微小加圧力および印加電圧のもとにおいては、安定した周波数で均一化された微小液滴が作りだされる。これらの現象は、工学的に多くの面で応用されており、その代表的な例として静電噴霧塗装法や静電型インクジェットプリンタなどが挙げられる。前者は静電微粒化現象の中で、霧状不均一な粒子を利用したものであり、後者は鮮明な画像を得るために、制御の容易な一定電荷をもつ均一な微粒子を必要とする。このような微粒子形成に関する諸因子の影響はかなり調べられているが、いまだ十分な理解が得られる状況には至っていない。本研究では静電場における液滴形成の研究として静電均一微粒化現象を解明するため、印加電圧、液体流量、細管ノズル管径、細管-加速電極間隔を広範囲に変化させるとともに各種液体の電気伝導度、表面張力、粘度などの物性値を変化させ、それらが液滴の均一微粒化現象に及ぼす影響を実験的に調べる。さらに次元解析を行って、均一微粒化状態を支配するこれらの諸因子の相関関係を明らかにした。

I 緒言

細管ノズルより流出する液体に高電圧を印加すると、細管先端において、液体は静電引力と表面張力の相互作用により微粒化する。このような現象については多くの研究がなされている^{(1)~(4)}。この場合、適当な微小加圧力および印加電圧のもとにおいては、均一化された微小液滴および安定した微粒化周波数(単位時間当たりの粒子数)が作りだされる。これらの現象は、工学的に多くの面で応用されており、その代表的な例として静電噴霧塗装法や静電型インクジェットプリンタなどが挙げられる。前者は静電微粒化現象の中で、霧状不均一な粒子を利用したものであり、後者は鮮明な画像を得るために、制御の容易な一定電荷をもつ均一な微粒子を必要とする。このような微粒子形成に関する諸因子の影響はかなり調べられているが、いまだ、十分な理解が得られる状況には至っていない。

本研究では、静電場における液滴形成の研究として静電均一微粒化現象を解明するため、印加電圧、液体

流量、細管ノズル管径、細管-加速電極間隔を広範囲に変化させるとともに各種液体の電気伝導度、表面張力、粘度などの物性値を変化させ、それらが均一微粒化現象に及ぼす影響を実験的に調べる。さらに次元解析を行って、均一微粒化状態を支配するこれらの諸因子の相関関係を明らかにする。

II 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。装置は液体供給部、圧力部、高電圧電源部、ノズルヘッド部および測定部より構成されている。供試液体は圧さく空気(1.5~6.0 kPa程度加圧)により液体タンクからノズルに供給される。ここで液体に高電圧を印加すると、接地された加速電極によってノズル先端にできたメニスカスは加速電極のほうに引かれ微粒子状態となる。

細管ノズルはガラス製で、外径 D_o 、内径 D_i および長さ l は表1に示す通りである。ノズル先端は管軸に直角に研磨してある。実験時に、外壁に液滴が付着すると飛しょう特性が変化する⁽⁵⁾ので、その防止のため

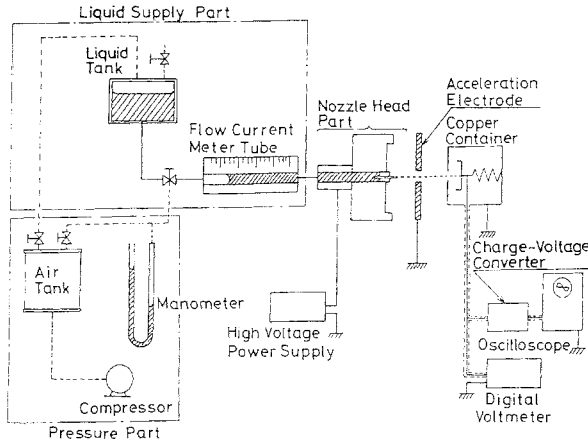


図1 実験装置概略図

表1 ノズルの寸法

Nozzle	D_o μm	D_i μm	l mm
a	340	170	20
b	250	150	20
c	260	120	20
d	230	120	20
e	200	90	20

にシリコンを塗布した。加速電極は直径50mm、厚さ0.85mmの銅製円板で、中央に液滴を通過させるために直径4.5mmの穴が設けられている。またノズル先端と加速電極の距離 L は2.5、4.0、5.0、6.25mmとした。電場生成には直流電源を用い、電圧調整器により電圧 $\phi = 0 \sim 5 \text{ kV}$ まで変えることができる。流量 Q は非常に少なく、また液滴は電荷を帯びているため飛散しやすい。よって本実験では、液体を加圧する部分に流量測定用細管(0.0005mlごとに目盛が刻されている)を用い、細管内の液体の減少量を測定することによって流量を求めた。この場合、流量測定用細管はノズルと同じ高さに取り付けてある。微粒化周波数は、銅製の容器に液滴を受け止めて電荷電圧変換回路を用い、その変動周期をオシロスコープで読み取ることによって求めた。また、ストロボスコープを用いて測定した微粒化周波数の値とオシロスコープで読み取った値とが一致することを確かめている。液滴の帯電量は微粒化周波数測定用容器に内蔵されている抵抗に流れる電流を測定し、その値を微粒化周波数で除することによって求めた。供試液体としては、イオン交換水をベースとしてこれにKCl、エタノールおよびグリセリンを加えたものを使用した。これら液体の電気伝導度、表面張力、粘度、密度などの物性値を表2に示す。なお実験中、液温を一定(13℃)に保つように注意した。

表2 供試液体の物性値

温度 13℃

Additives	Wt%	Electric conductivity $\text{K } 1/\Omega\text{m}$	Surface tension $\sigma \text{ N/m}$	Viscosity $\mu \text{ Pa}\cdot\text{s}$	Density $\rho \text{ kg/m}^3$
KCl	0.05%	7.76×10^{-2}	7.55×10^{-2}	1.32×10^{-3}	1.041×10^3
KCl	0.08%	1.19×10^{-2}	7.55×10^{-2}	1.32×10^{-3}	1.041×10^3
KCl	0.1%	1.46×10^{-1}	7.55×10^{-2}	1.32×10^{-3}	1.041×10^3
KCl	0.5%	6.47×10^{-1}	7.47×10^{-2}	1.31×10^{-3}	1.043×10^3
KCl	0.8%	1.17	7.38×10^{-2}	1.28×10^{-3}	1.046×10^3
KCl	1%	1.46	7.28×10^{-2}	1.27×10^{-3}	1.047×10^3
Ethanol	2%	9.71×10^{-1}	6.46×10^{-2}	1.24×10^{-3}	1.041×10^3
Ethanol	5%	8.32×10^{-1}	5.73×10^{-2}	1.35×10^{-3}	1.037×10^3
Ethanol	10%	7.28×10^{-1}	4.97×10^{-2}	1.73×10^{-3}	1.028×10^3
Glycerin	10%	7.28×10^{-1}	5.52×10^{-2}	1.61×10^{-3}	1.046×10^3
Glycerin	20%	6.47×10^{-1}	5.50×10^{-2}	1.81×10^{-3}	1.059×10^3
Glycerin	30%	5.30×10^{-1}	5.33×10^{-2}	2.48×10^{-3}	1.084×10^3

Ethanol and Glycerin solutions contain KCl 0.7% respectively

III 実験結果および考察

1. 微粒化の特性

ノズルの外径 $D_o = 260 \mu\text{m}$ 、内径 $D_i = 120 \mu\text{m}$ 、ノズル-電極板の距離を2.5mm一定値に保ち、イオン交換水にKCl0.5%を添加した液体を用いたときの飛しょう状態および周波数と印加電圧の関係を図2に示す。

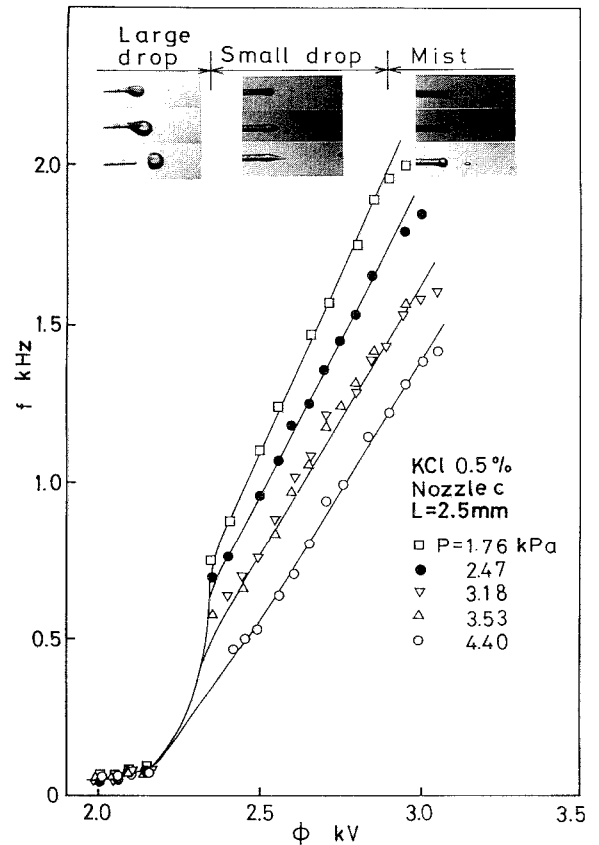


図2 飛しょう状態および周波数—印加電圧

- (1) 印加電圧 $\phi = 2.0 \text{ kV}$ 度から大きな液滴が飛び出し始め、周波数は数10~100Hz程度である。この状態を粗大粒子状態とよぶ。
- (2) 印加電圧 $\phi = 2.35 \text{ kV}$ 付近になると微粒化周波

数は急に増加する。すなわち静電気力により強く引かれるために、ノズル先端に先細のメニスカスができ液滴は均一で安定した微粒となり飛出す。この状態を微粒化状態とよぶことにする。微粒化状態では、印加電圧に比例して微粒化周波数は増加していくことがわかる。また一定の印加電圧であるならば背圧Pの低いほうが微粒化周波数が高く、小さな液滴が作られている。これは、同じ印加電圧ならばノズル先端に形成するメニスカスの極率が小さいほう（背圧が低い）が電界強度が大きく、早く加速電極のほうに飛び出していくからである。かくして、微粒化周波数はノズル先端に形成される液滴の大きさと密接に関係することがわかる。

- (3) 印加電圧 $\phi = 2.9\text{kV}$ 以上になると粒子分裂を起こして霧化となる。これを霧化状態とよぶことにする。この状態は周波数が不均一でストロボスコープで測定することができない。

以下においては微粒化状態についてのみ述べることにする。図3は図2の微粒化周波数のかわりに液滴径について示したものである。図3より、一定の印加電圧においては背圧が小さいほど液滴径は小さくなっていることがわかる。また背圧が一定では、印加電圧が大きくなると液滴径は小さくなる傾向にある。印加電圧が $\phi = 2.7\text{kV}$ 程度までは液滴径の変化は比較的大きいが、それ以上になると液滴径はほぼ一定となる。図4は印加電圧をパラメータとして背圧と流量の関係を示したもので、両者は直線関係にある。この直線のこう配はポアズイユ流れから計算される値と一致する。これらの直線が原点を通らないのは、よく知られているように表面張力によって形成されるメニスカスにおける圧力増加分とそれに作用する静電気力のためである。図5は一定の印加電圧のもとにおける種々の液体に対する液滴径と流量の関係を示す。これより、印加電圧が一定であるならば物性値が異なっても両者は直線関係にあるのがわかる。すなわち、液滴径は流量の大きいほど大きくなることわかる。

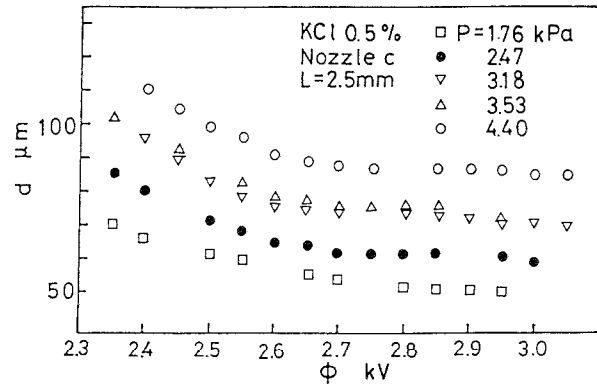


図3 微粒化液滴径—印加電圧

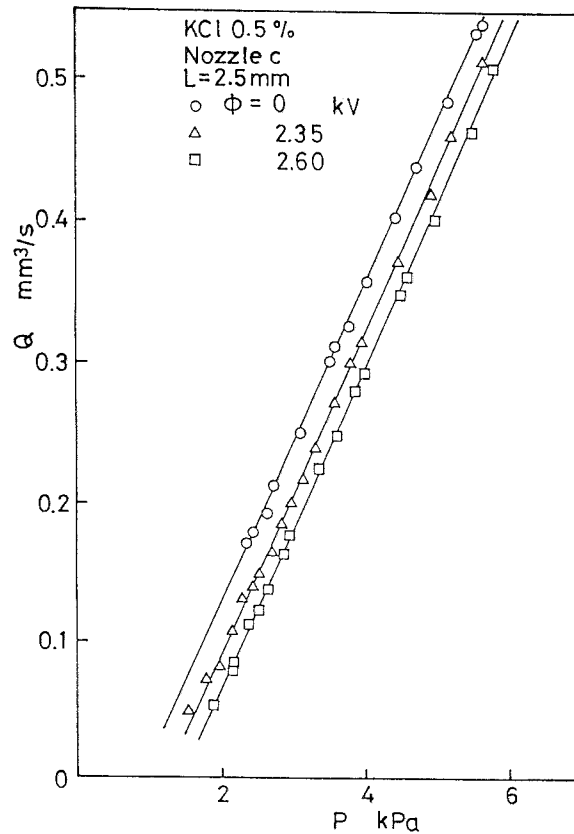


図4 流量—背圧

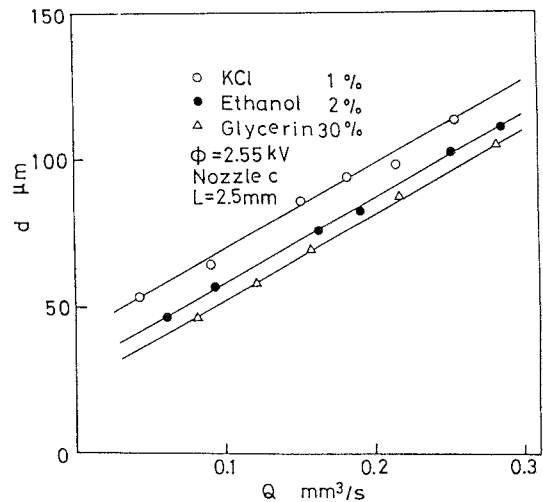


図5 液滴径—流量

2. 細管ノズルと電極板間距離

図6はKC10.08%を添加したイオン交換水を用い、ノズル径 ($D_0=250\mu\text{m}$ 、 $D_i=150\mu\text{m}$) を一定とし、ノズル先端と電極板の間の距離を変化させた場合における流量と印加電圧の関係を示す。印加電圧が一定であるならば、背圧が大きく、ノズルと電極板間距離が大きいほど流量は大きくなっている。また印加電圧が大きくなるほど流量は減少していくことがわかる。図7は背圧一定で、ノズルと電極板間距離Lを変化させ、微粒加状態で液滴径d=一定を得るための印加電圧 ϕ を示したものであり、両者は正のこう配をもつ直線関係にある。この図より、同一のLに対して液滴径dが小さいほど ϕ が大きくなることがわかる。

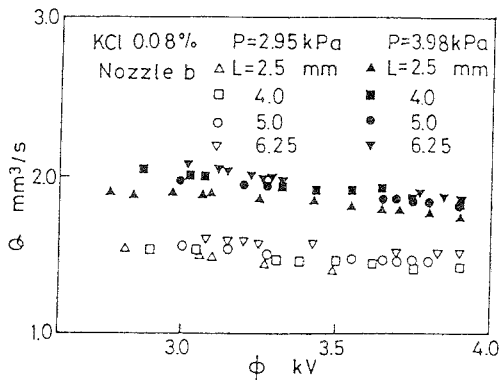


図6 流量—印加電圧

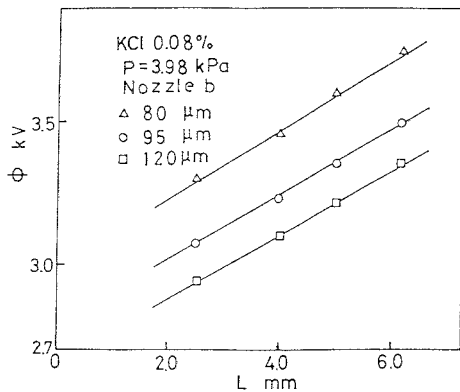


図7 印加電圧—ノズル先端・電極板間距離

3. 管径の影響

ノズル先端と電極板間距離Lおよび背圧Pを一定にして、ノズル内径 D_i を変化させたとき一定の微粒化周波数fを得るための印加電圧 ϕ を測定した結果を図8に示す。この図より、同一の微粒化周波数はノズル管径が小さいほど小さい印加電圧によって得られることがわかる。これは管径が小さいほどメニスカスが小さく電界強度が強くなり、液滴が加速電極の方向に飛び出しやすくなるためである。また微粒化周波数と印加電圧の関係をノズル管径をパラメータとして整理す

れば、最大微粒化周波数が得られる印加電圧はノズル管径が小さいほど小さくなっているのがわかる。

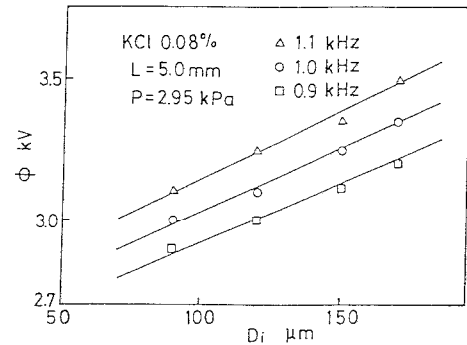


図8 印加電圧—ノズル内径

4. 電気伝導度の影響

電気伝導度はノズル先端に発生する液滴上の帯電状態に影響を与えると思われる。ところで、微粒化を行うためには液体の電気伝導度が 10^{-10} [$1/\Omega \cdot \text{m}$] 以上であることが必要であるといわれている⁽⁶⁾。本実験ではイオン交換水にKC1を加えてイオン濃度を变化させ、電気伝導度の範囲を $7.46 \times 10^{-3} \sim 1.46$ [$1/\Omega \cdot \text{m}$] まで変えて、それが微粒化におよぼす影響を調べた。図9は一定背圧における電気伝導度Kと微粒化周波数fの関係を、印加電圧 $\phi=2.45$ 、 2.55 、 2.60 kVのそれぞれについて求めた結果を示す。この図より、微粒化周波数は一定の印加電圧に対して電気伝導度が大きくなるにつれ増加していくが、 $K=6.47 \times 10^{-1}$ [$1/\Omega \cdot \text{m}$] 付近で微粒化周波数のピークの存在することがわかる。

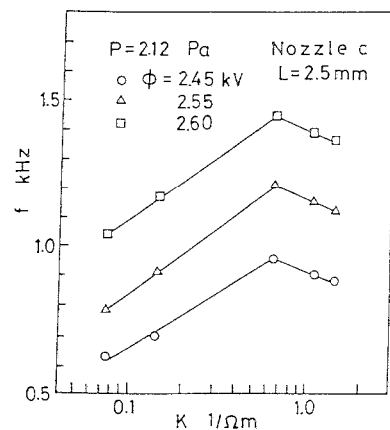


図9 微粒化周波数—電気伝導度

5. 表面張力の影響

表面張力の静電微粒化特性におよぼす影響を調べるためにエタノールを添加し、表面張力を変化させて実験した。図10は、背圧をパラメータとして微粒化最小電圧 ϕ_{min} と表面張力 σ の関係を示す。この図から

表面張力を下げると印加電圧が低くても微粒化が始まることがわかる。これは、表面張力が下がると細管ノズル先端の液滴が低い電圧でも加速電極のほうに引かれ微粒化状態となるからである。また、微粒化最小電圧 ϕ_{min} は背圧によらず表面張力 σ と正のこう配をもつ直線関係にあることがわかる。

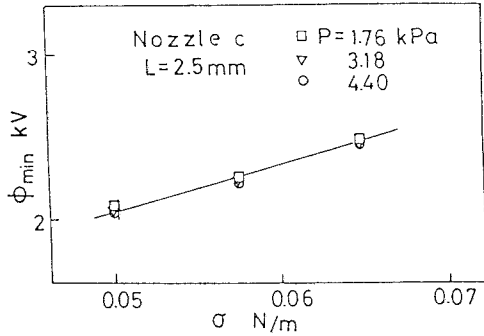


図10 微粒化最小電圧—表面張力

6. 粘度の影響

イオン交換水にグリセリンを添加することにより粘度を増加させ、液滴の微粒化特性に及ぼす粘度の影響について調べる。図11は粘度の異なる液体に対する微粒化周波数と印加電圧の関係を示す。一定の背圧に対してグリセリン30%水溶液はKC10.8%、エタノール10%水溶液に比べて同一微粒化周波数を発生する電圧が大きくなっている。図12は一定の背圧における微粒化周波数と粘度の関係を示したものである。粘度が大きくなるにつれて微粒化周波数が減少するのは、一定の背圧、電圧のもとでは粘度の増加に従い流量が減少するからであると思われる。

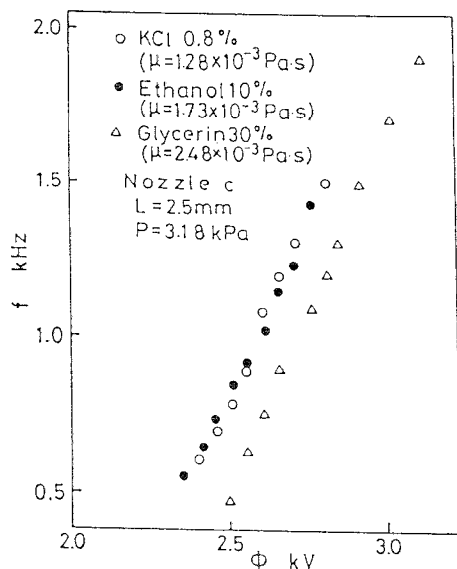


図11 粘度の異なる液体に対する微粒化周波数—印加電圧

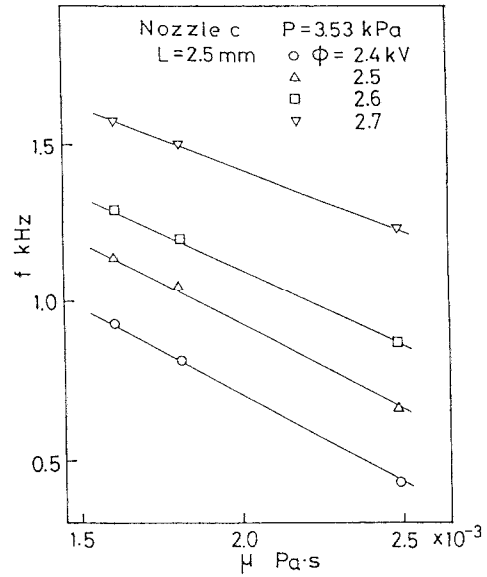


図12 微粒化周波数—粘度

7. 液滴径と帯電量

図13は液滴径 d と帯電量 q の関係をKC10.8%およびエタノール10%水溶液について調べた結果を示す。帯電量は一定の液滴径に対して電気伝導度、表面張力が大きいほど大きくなる傾向を有している。これは液滴の表面張力を低下させることによると考えられる⁽⁷⁾。図13に示した実線はVonnegutら⁽⁸⁾によるエネルギー最小の関係を用いて計算した結果である。

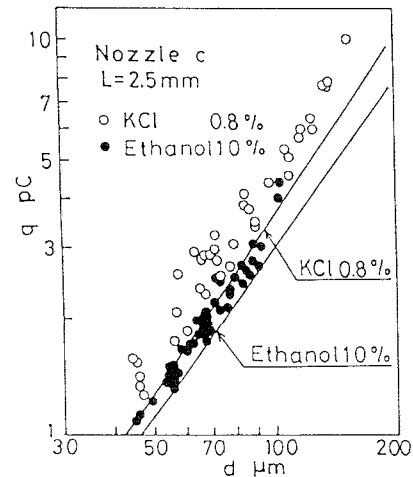


図13 帯電量—液滴径

8. 次元解析的考察

実験結果を整理するにあたり、まず以下のような次元解析考察を行う。液体の微粒化現象に影響を及ぼす因子として、印加電圧 ϕ 、ノズル先端と加速電極板間の距離 L 、ノズル外径 D_0 、ノズル内径 D_1 、管内平均流速 V_a 、液体の誘電率 ϵ 、液体の粘度 μ 、表面張力 σ 、電気伝導度 k 、液体の密度 ρ が考えられる。そこ

で微粒化現象を支配する無次元量として以下のものが挙げられる。すなわち

$$= N_{Q\sigma} = \frac{\epsilon_0 E^2 D_0^2}{\sigma D_0} = \frac{\epsilon_0 E^2 D_0}{\sigma}$$

(= $\frac{\text{クローン力}}{\text{表面張力による力}}$)

$$k = \frac{D_i}{D_0} = \frac{\text{ノズルの内径}}{\text{ノズルの外径}}$$

ただし、 $E = \phi / L$ は電場の強さを表す。

$$We = \frac{\rho V_a^2 D_i^2}{\sigma D_0} \quad (= \frac{\text{慣性力}}{\text{表面張力による力}})$$

: ウェーバ数

$$Re = \frac{\rho V_a^2 D_i^2}{\mu V_a D_i} = \frac{\rho V_a D_i}{\mu} \quad (= \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}})$$

: レイノルズ数

$$\delta = K / K_0$$

$$K_m = 10^{-10} [1 / \Omega \cdot m]$$

(微粒化最小電気伝導度)

$$K_0 = 10^8 \cdot K_m = 10^{-2} [1 / \Omega \cdot m]$$

である。したがって、無次元微粒化周波数は

$$f^* = f D_0 / V_a = f (N_{Q\sigma}, We, Re, k, \delta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

無次元微粒化液滴径は

$$d^* = d / D_0 = f (N_{Q\sigma}, We, Re, k, \delta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書きあらわすことができる。なお、本実験の試料は $7 \times 10^{-2} [1 / \Omega \cdot m]$ 以上の電気伝導度をもってしているので導体とみなせるから $\epsilon = \epsilon_0$ (真空の誘電率) とした。ただし $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ である。その他の物性値については表 2 に示してある。かくして実験データは $N_{Q\sigma}$ 、 We 、 Re 、 k 、 δ を用いて整理できるわけである。図 14 に無次元微粒化周波数 f^* を整理した結果を示す。すなわち、 f^* の実験式として

$$f^* = 29 \cdot \delta^{0.15} \cdot k^{0.2} \cdot M_{Q\sigma}^{0.3} \cdot We^{0.18} \cdot Re^{0.12} \quad \dots\dots (3)$$

が得られる。図 15 は無次元微粒化液滴径 d^* を整理した結果を示し、これより

$$d^* = 0.25 \cdot \delta^{0.2} \cdot k^{0.1} \cdot M_{Q\sigma}^{-3.5} \cdot We^{0.85} \cdot Re \quad \dots\dots (4)$$

なる実験式を得る。

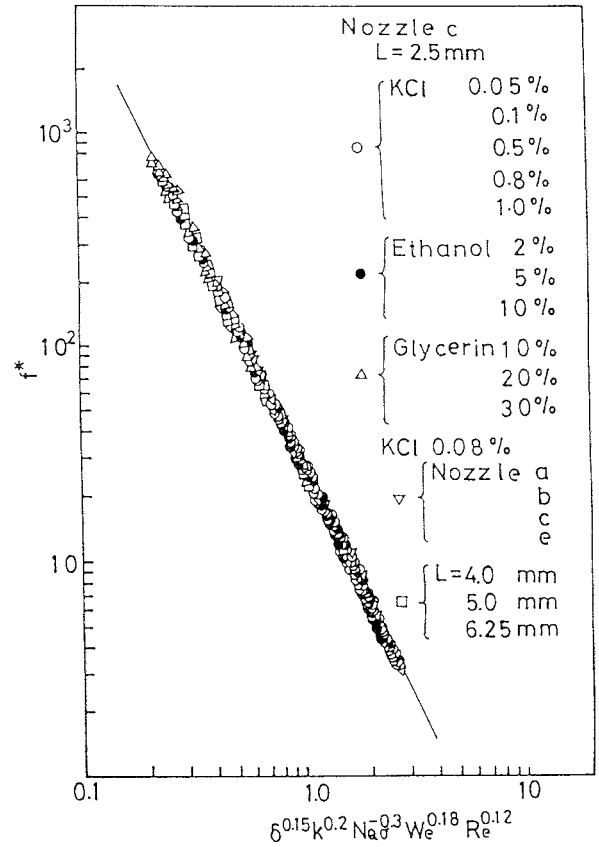


図 14 $f^* - \delta^{0.15} k^{0.2} N_{Q\sigma}^{0.3} We^{0.18} Re^{0.12}$

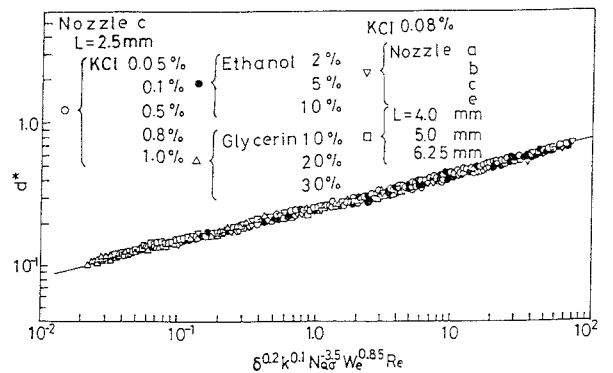


図 15 $d^* - \delta^{0.2} k^{0.1} N_{Q\sigma}^{-3.5} We^{0.85} Re$

IV 結 論

静電場における液滴形成の研究の一環として、微粒化現象に関して、印加電圧、背圧、ノズル管径、ノズル先端と加速電極間の距離および液体の物性値を変えて広範囲の実験を行うとともに次元解析をも行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 微粒化状態の範囲内では、印加電圧が大きいほど粒子発生周波数は高くなり、液滴径は小さくなる。
- (2) 一定の微粒化液滴径を得るには、ノズル先端と加速電極間の距離 L が大きいほど印加電圧を大き

くしなければならぬ。

- (3) 一定の微粒化周波数を得るには、管径が大きいほど印加電圧は大きくなる。
- (4) 無次元微粒化周波数 f^* および無次元微粒化液滴径 d^* は、 N_{q0} 、 We 、 Re 、 k 、 δ に依存する実験式によって表される。

文 献

- (1) Drozin, V.G., J Colloid Sci., 10 - 2 (1955), 158.
- (2) 棚沢・荒木、機論 37 - 298 (昭46), 1178.
- (3) 森・ほか 2 名、機論 47 - 421, B (昭56), 1881.
- (4) 安居院・中島、電学論 97 - 11 (昭52), 223.
- (5) 安居院・ほか 2 名、電子写真 15 - 2 (昭52) 38.
- (6) 渡辺、応用物理, 37 - 4 (昭53), 314.
- (7) Schene, H., Ind. Lackier-Betr., 34 (1966), 431, 471
- (8) Vonnegut, B. and Neubauer, R.L., J. Colloid Sci., 7 - 6 (1952), 616.