

気液混合系における液滴粒度の測定[†]

呂 硯山*・黒川 一夫**

ABSTRACT There are many chemical plants using a gas-liquid two phase flow for carrying out separation process and chemical reactions. The measurement of the size distribution of liquid dropets is an important parameter in the understanding of hydrodynamic and mass transfer characteristics of such chemical plants.

This paper describes the model and the analysis of the gas-liquid mixed phase chemical system, and the results of the electronic measurement of the liquid-dropet size. The simple model of the dropet can be sufficiently detailed to represent the aspects of the system behavior. The result of the electrical circuit analysis shows that the electric resistance of the dropet is the most important factor and capacitance is not the basic factor for the electronic measurement in the two phase flow chemical equipment.

Finally, the model validity is performed by smplified experiments and the relation between the conductivity of the dropet and the output voltages of the amplifier is linear in its limited range of the conductivity of the liquid.

1. はじめに

化学工業装置中には、気相と液相の共存する異相系を扱うものがある。一例として図1に塔型反応装置を示す。液相物は装置の上部から、気相物は下部から流入させると、各相の塔板間には細かい液体の粒（液滴）で満たされる。この際、異相系の噴射流動作用によって、種々な直径の液滴が発生することが知られている。

この液滴の粒度と降下速度とそれらの分布は、化学工業装置の流体力学的特性および化学反応特性に大きな影響を与えるために、装置の制御特性を改善し、より生産効率を高めるためには液滴の粒度とその分布を実時間内で計測することがまづ必要になる。

そのため、異相系における液滴粒度の電気的計測法が、アメリカ、オーストラリアにおいて研究され、特に、オーストラリアの C. J. D. Fell 教授 (University of New South Wales) を中心に盛んになってきている。その原理は図2に示す検出素子の探針に液滴が衝

突するときに生ずる電気的な変化を増幅して出力電圧として観察する方法であるが、液滴の特性や検出系の解析が不十分で、この複雑な現象に対して測定の限界や条件が明らかにされていない¹⁻⁴⁾。

本論文は北京化工学院が開発した「液滴粒度とその分布の電気的計測法」に基づき、異相系と計測系とのモデルを考え、各系の分析と解析とを行ない、その結果を実験により検討し液滴粒度測定の基本的動作原理を明確にしたものである。ここで開発した計測系の検証結果はマイクロコンピュータを用いれば計測の自動化、さらには異相系を扱う化学工業装置の自動化に適

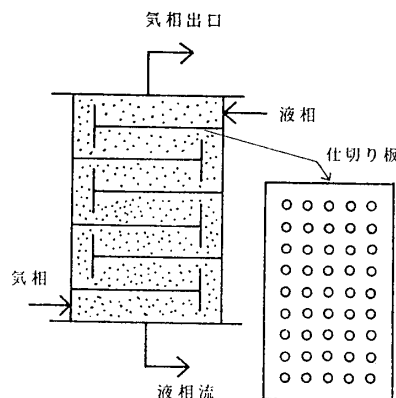


図1 塔型反応装置の原理図

The Electronic Measurement of the Size of the Dropet in Gas-Liquid Contacting Equipment. By Yan-Shan Lü (Beijing Institute of Chemical Technology) and Kazuo Kurokawa (Science University of Tokyo).

*北京化工学院自動化系 **東京理科大学工学部

†1987年4月9日受付

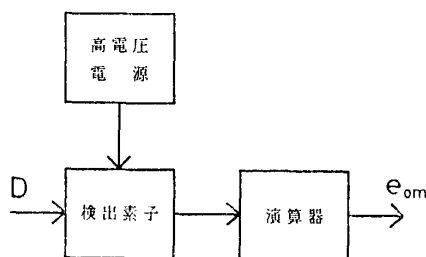


図2 検出素子の原理図

しており今後の発展が期待できる。

2. システムのモデル化

気液両相の混在する化学システムを扱う場合には、プラントの持つ複雑な動作をどのようにモデル化するか、また計測系に要求される項目について考察する必要がある。従って、気液両相の共存する場合の液滴の運動について検討し、次に計測系のモデルの動作解析から着手する。

2.1 気液両相共存下における液滴の運動

2.1.1 液滴の降下速度

気液異相系中の液滴は下部からの気体の噴射流動によって、種々な直径の粒子になってプラント内に存在している。このとき、液滴の運動は気体の上昇速度、温度と液滴の直径、密度と表面張力および気体に対する液滴の抵抗などによって決定されるが、3次元空間中をランダムに運動する。しかし、本研究で測定されるのは、液滴の直径（粒度）とその分布である。この測定によってプラントの内部の液滴に関してどのような情報が得られるかを吟味する。液滴はランダムに運動しながら全体としては垂直軸方向に落下していく。いま液滴の半径を a 、密度を ρ 、液滴が気体中を運動するときの抵抗の比例定数を κ とすると液滴が等速運動（垂直軸）となるのは⁵⁾、

- (1) 速度に比例する抵抗を受ける場合

$$\text{平衡速度 } V_l = \frac{mg}{\kappa} = \frac{4\pi a^3}{3} \rho \cdot \frac{g}{\kappa} \quad (1)$$

（最終速度）

- (2) 速度の平方に比例する抵抗を受ける場合

$$\text{平衡速度 } V_l = \sqrt{\frac{mg}{\kappa}} = \sqrt{\frac{4\pi a^3}{3} \rho \cdot \frac{g}{\kappa}} \quad (2)$$

- (3) 速度の n 乗に比例する抵抗を受ける場合

$$\text{平衡速度 } V_l = \left(\frac{4\pi a^3}{3} \rho \cdot \frac{g}{\kappa} \right)^{1/n} \quad (3)$$

最後に液滴が降下中に互いに衝突しあい、その半径を変化していく場合が考えられる。実際の反応塔内の現象はこの範疇に入ると思われるが、このような不規

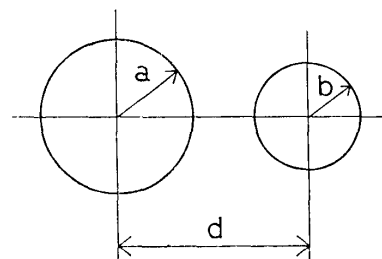


図3 2つの液滴が近接してある場合

則な現象の扱いは統計物理学による解析を必要とし、今後の問題として残しておく。もし、降下中一定の割合で半径が増大するとすれば次の計算で求められる。

- (4) 液滴が降下中、一定の割合で大きくなる場合
初めの液滴の半径を a_0 、半径の変化率 $C=da/dt$ とすれば t 時間経過後の液滴の落下速度 V は

$$V = \frac{1}{4} g t \left(1 + \frac{a_0}{a} + \left(\frac{a_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right) \quad (4)$$

となる。

以上の考察より、反応塔中では液滴の半径に従い、種々な降下速度のものが存在していると思われるが個々の液滴について、その運動を追うことは放棄しても塔内の測定箇所での液滴の半径とその分布を知れば、それらが化学反応上、目的としている値にあるか否かを判定することが可能であり、もしも不適であれば目標値になるように制御することが可能である。大きな反応塔中、すべての空間で液滴粒度とその分布が一樣になっているとは考えられない。各板間での平均液滴密度が変化しているとすれば定常流でないことを示していることになる。

2.1.2 液滴の電氣的モデル

反応塔中の液滴の形状は種々なものが存在していると推定し得るが、大半の液滴は球形のものとしてそれほど、大きな誤差はないと考えられる。半径 (a) の球が空中にあるとすると、その静電容量 (C_a) は

$$C_a = 4\pi\epsilon_0 a \quad (5)$$

である。近くに半径 (b) の液滴が図3に示す状況にあるときは

$$C_a = 4\pi\epsilon_0 \left\{ 1 + \frac{mn}{1-n^2} + \frac{m^2 n^2}{(1-n^2)^2 - m^2} + \dots \right\} \quad (6)$$

$$\text{ここに } m=a/d \quad n=b/d$$

になることはよく知られている。普通の装置の稼動状態では液滴相互間の影響は無視できる程度であることは実験的に確かめられているので、ここでも(5)式が成立するとして、以下の考察を進める。しかし、将来より液滴密度の高い条件下で生産する場合、(6)式

表 1 液滴半径と等価電子個数の関係

液滴の半径 (mm)	印加電圧 (V)	電荷量 (Q)	等価電子個数 ($Q/1.602 \times 10^{-19}$)
0.01	500	5.56×10^{-13}	5×10^6
0.1	500	5.56×10^{-12}	5×10^7
1.0	500	5.56×10^{-11}	5×10^8
10.0	500	5.56×10^{-10}	5×10^9

の補正を考慮することも留意しておくことが必要である。

液滴の電気的性質を論ずるとき、液滴のもつ電荷に注意しなければならない。一般に液体が分裂して液滴になるときは、各液滴には必ず電荷が含まれることが昔から知られている。しかし、この計測装置は後述するように測定用探針に 500 V 前後の電圧を印加している。半径 (a) の液滴が電圧 (V) で充電されると、その電荷 (Q) は

$$Q = C_a V = 4\pi\epsilon_0 a V \quad (7)$$

である。表 1 に半径 a を 0.01~10 mm まで変えたときの充電電荷量と、それが何個分の電子の電荷に相当するかを求めておいた。0.01 mm のときでも充電電荷は 5.56×10^{-13} クーロンで、これは約 5×10^6 個分の電子電荷になる。このような多数の分離電荷が液滴に附着することはないと思われるが、この確認は実験によることにした。

液滴の静電容量と並んで重要な電気的性質として液滴のもつ抵抗 (r_a) がある。電磁気学によれば、静電容量と抵抗の間には一定の関係があり、

$$r_a C_a = \frac{\epsilon}{\gamma} = \epsilon \rho \quad (8)$$

ここに γ : 導電率, ρ : 固有抵抗が成立する。液滴の周囲が空気であると仮定すると、その導電率は液滴のものと比較すると割合小さい値であるから液滴の導電率が大きな範囲では (8) 式が正確に成立するとみてよい。したがって、(8) 式に C_a の式を代入して

$$r_a = \frac{1}{4\pi a \gamma} = \frac{\rho}{4\pi a} \quad (9)$$

と簡単な形で表現し得る。

問題は γ である。液滴は製造目的により種々な化学物質を広範囲にわたる濃度で含んでいるため、 γ の値はかなり大きな値から小さな値におよぶ。

2.2 液滴検出用探針

2.2.1 探針の静電容量

液滴粒度検出用の検出要素の構造を図 4 に示す。AB

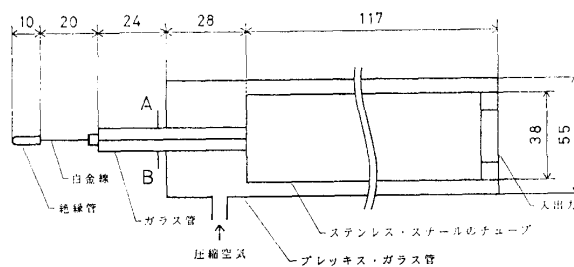


図 4 検出素子

面から左側が反応塔の中に入る。圧縮空気は液体が検出要素の演算部に入り電気回路の絶縁を低下させるのを防ぐために用いられている。探針は白金線で両端が絶縁物で覆れていて、ある特定の中間部分だけに液滴が衝突するようになっている。

両端の絶縁物の部分の誘電率を無視するとすれば、接地面上、高さ l 、線半径 r の探針のもつ静電容量 (C_n) は $l \gg r$ のもとで

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\log\left(\frac{l}{\sqrt{3}r}\right)} \quad (10)$$

で表わされる。 $r=0.25(\text{mm})$, $l=0.5(\text{m})$ とすれば、 $C_n=3.94 \times 10^{-12}$ (F) となる。

もちろん、実際の探針は反応塔の壁面に図 4 のように横形に取付けられるが、壁面を接地とみれば (10) 式でよい。

この探針に液滴が衝突するときの様子を理想化して図示したのが図 5 である。衝突後は液滴は分裂したり変形して落下するが、接触時の極く短い時間を考えれば液滴は探針により充電されるので、充電電流は探針を通して流れる。したがって、この種の検出器の検出能力は C_a と C_n の比によって決定されるのでこの比が検出器として重要な定数となる。

C_n の値は実装状態では検出素子 (図 4) の回路用のプリント板 (ステンレスチューブ内) まで線を引き廻される上、探針そのものに誘導率が 1 より大きい絶縁物を被せられるので (10) 式とは大分違った値になる。よって、この値はインピーダンスメータで実装状態の値を直接測定し、その値を用いることにした。実測の結果、約 400 pF と出た。これを C_m とする。

最終的にこの種の計測装置の感度を決定するのは、 C_a/C_m に探針に印加している電圧 (500 V) を乗じたものが一応の目安となる。

2.2.2 探針上の液滴衝突位置の影響

同一直径の液滴が探針に衝突しても、探針上の電荷密度が異なるために検出電圧は衝突位置により影響を

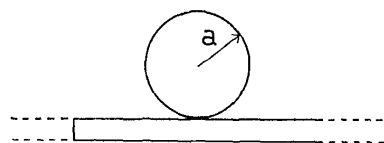


図5 液滴が探針に衝突するときの状態仮想図

受ける。この影響をモデルにより数値的に把握することは非常に困難である。探針の先端に電気力線が集中し、ここが一番感度が良いという程度のことはすぐわかるが、それ以上のことはコンピュータで有限要素法などを用い近似的に解いていかなければならず、大変な作業となる。

そこで、衝突位置による影響は試作後に実験によって計測に都合の良い範囲を見出すというやや安易な方法を採用し、適切な範囲以外は絶縁物で被うこととしたのである。この時、絶縁物の上にも液滴は衝突してくるが、絶縁物は高抵抗であるから充電電流は殆んど流れず、白金線に直接、接触してくる液滴に対しては全く無視してよい。なお、白金線についた液滴は液体と金属の表面張力の違いより白金線を濡すことなく完全に落下する。

2.3 現象の電気的モデルと増幅回路

2.3.1 衝突時の電気的モデル

液滴が探針に近づいて、これに衝突する際の電気的な現象を考察してみると(5)式などで得た液滴の静電容量はすべて空間中には、液滴以外に他のものは存在しないものとして計算したものである。しかし、探針と液滴の距離が近づくに従って、厳密には探針と液滴間の静電容量が問題になってくる。いわゆる誘導電荷が測定系に変化を与えることになる。しかし実験による検討ではこの影響はほとんど認められていない。これは探針の近くにきた液滴は、探針の高い電圧のために引き寄せられ急激に加速されて比較的短時間内に衝突を生ずること、また半径が大きく慣性のため急速な運動のできない液滴は誘導電荷が問題にならないことを示していると解される。

以上の結果より液滴に対する静電容量は(5)、(7)式の値で近似的に計算を行なってもよいと結論づけることができる。図6は、この仮定のもとで液滴が探針に衝突した瞬間の等価回路を示したもので点線内が液滴の電気的性質を代表した部分である。

図6の探針の電位の変化は演算増幅器に送られ、適当な範囲の電圧に達するまで増幅が行なわれるが $E_1 = 500V$ の高い電圧が加えられているので絶縁用コンデ

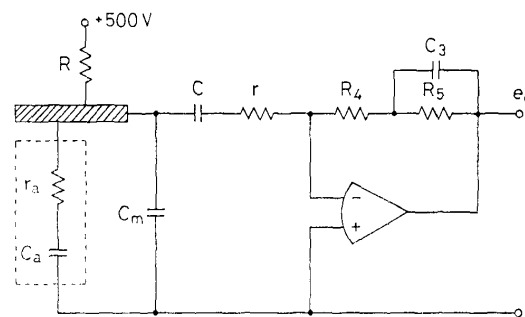


図6 センサー部等価回路

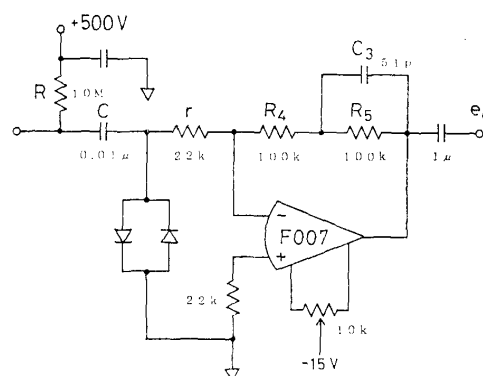


図7 演算器

ンサで高電圧をカットする必要がある。

2.3.2 検出回路

検出回路は1個の演算増幅器を使って図7に示す構成とした。演算増幅器は高周波域まで利得を持っている必要があるが、ここではオーストラリア産のF007を用いている。注)

探針に液滴が衝突していない定常状態にある検出回路の等価回路は図6の液滴の点線部を回路からはずしたものになる。 C_m 、や絶縁コンデンサは500V電源より充電され、ある平衡状態にある。そこへ、静電容量(C_a)抵抗(r_a)の液滴が衝突してくると $C_a - r_a$ の回路が図6のように接続されることになり、一時的に平衡状態が破られることになる。

その過渡特性は鳳、テブナンの定理を用いて図8の

注) このF007の演算増幅器に関しては詳細が不明である。007をつけた演算増幅器は他にもあるが、それらはそれ程、高速でなくゼロクロス周波数は1MHz程度である。しかし後に実験によって示すが、これは相当高速である。したがって007とは違うものか、あるいはオーストラリア側で007の中から特別、応答の速いものだけを選定して数個を中国側に提供したとも考えられる。

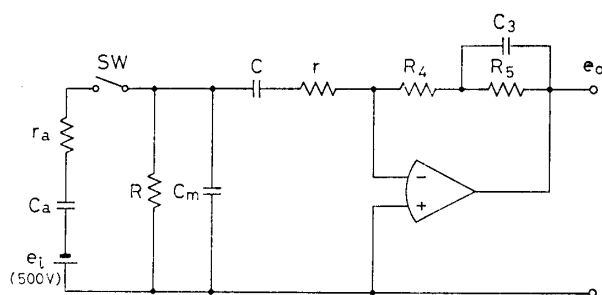


図 8 過渡等価回路

回路のスイッチを閉じたときに生ずる過渡現象を計算すればよい。計算を簡単にするために演算増幅器は理想特性をもつものとする。入力側の短絡伝達アドミタンス (Y_i)、増幅器出力側からみた短絡伝達アドミタンス (Y_f) より演算器の出力電圧 $E_o(s)$ は⁶⁾

$$E_o(s) = -\frac{Y_i}{Y_o} E_i(s) = -Y(s) E_i(s) \quad (11)$$

となる。

ここで、 $E_i(s)$ 、 $E_o(s)$ は入出力電圧のラプラス変換である。 $Y(s)$ は

$$Y(s) = \frac{Y_i(s)}{Y_f(s)} = \frac{\{(R_4 + R_5) + sC_3R_4R_5\}s^2CC_aR}{1 + a_0s + a_1s^2 + a_2s^3 + a_3s^4} \quad (12)$$

である。ただし

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= C_aR + CR + Cr + C_ar_a + C_mR + C_3R_5 \\ a_1 &= CC_aRr + CC_aRr_a + CC_arra \\ &\quad + C_mC_aRr_a + CC_mRr + (C_aR \\ &\quad + CR + C_ar_a + C_mR + Cr)C_3R_5 \\ a_2 &= CC_mC_aRr_r_a + (CC_aRr + CC_aRr_a \\ &\quad + CC_arra + C_mC_aRr_a + CC_mRr) \\ &\quad \cdot (C_3R_5) \\ a_3 &= CC_mC_aC_3RR_5rr_a \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

である。

ここで探針の静電容量を実測値の 400 pF を用い、液滴の電気的な数値として、 $C_a = 0.15$ pF (半径 $a = 1.35$ mm に相当)、 $r_2 = 5 \Omega$ (導電率 117 mScm^{-1} の液体に相当) と仮定して計算すると、出力電圧が最大になる時間 (t_m) とその値 (e_{0m}) は

$$t_m = \frac{\log \frac{s_2[(R_4 + R_5) + s_2C_3R_4R_5]}{s_3[(R_4 + R_5) + s_3C_3R_4R_5]}}{s_3 - s_2} \quad (14)$$

$$e_{0m} = \frac{500}{(s_3 - s_2)C_mC_3R_5rr_a s_4} \cdot \{[(R_4 + R_5) + s_2C_3R_4R_5]e^{s_3t_m} - [(R_4 + R_5) + s_3C_3R_4R_5]e^{s_2t_m}\} \quad (15)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} s_2 &= -1.18 \times 10^{+5} & s_3 &= -1.97 \times 10^5 \\ s_4 &= -1.33 \times 10^{12} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

となる。この結果は重要である。相当に簡略化したモデルをもとに解析を行ってきたのであるが、(15) 式はこれまで考えていたように最大出力電圧は直接、液滴の半径に比例するのではないことを示している。

即ち、(15) 式の元になっているのは (12) 式の 4 次方程式の根である。周知のように 4 次方程式の根は厳密解を求めることができ、各根は方程式の各次数の係数を使って計算することができる。その係数は (13) 式によって与えられるが、液滴の電気的定数 C_a 、 r_a は他の回路定数に比べると桁違いに小さいの a_3 で以外では c_a 、 r_a を含む項の影響は小さく、決してドミナントな値になることはない。したがって (15) 式の中の根も、 C_a 、 r_a に対してそれほど、変化することはないと思惟し得る。

しかし、 a_3 は各回路定数の積であるから C_a 、 r_a も直接的である。(15) 式の分母の各定数は a_3 から誘導されてきたもので、 C_a は分子の方にある分と打消されて式から消えている。したがって液滴の定数として r_a だけが残っている。 r_a は (8) 式によって Ca と関係づけられているから、

これを用いて (15) 式を書き直せば

$$e_{0m} = \frac{500C_a r}{(s_2 - s_3)C_mC_3R_5r\epsilon} \cdot \{[(R_4 + R_5) + s_3C_3R_4R_5] \cdot e^{s_2t} - [(R_4 + R_5) + s_2C_3R_4R_5] \cdot e^{s_3t}\} \quad (17)$$

となり、演算器の最大値は C_a に直接比例することになる。しかし、(17) 式が成立するためには、(8) 式の相似則が成立する範囲に限られ、液滴の雰囲気が消浄な空気であればかなり正確に成立するものと思われるが、実際の反応塔では気相の導電率よりも相当、大きな値となるものと考えておくべきであろう。その相似則の崩れるところが、本計測法の限界を与えることになる。

図 9 は $e_0(t)$ を計算したもので、このときの最大出力電圧 $e_{0m}(t)$ は 0.92 と計算される。

3. 実験による検討

以上で探針による液滴の直径の計測システムのモデルとその動作解析が一通り終了したので、モデリングに際して採用した種々な仮定が適切であったかどうかを実験により検証する。

3.1 e_{0m} と液滴の半径 a の関係

本研究の最終的な目的である e_{m0} と a の関係を確認

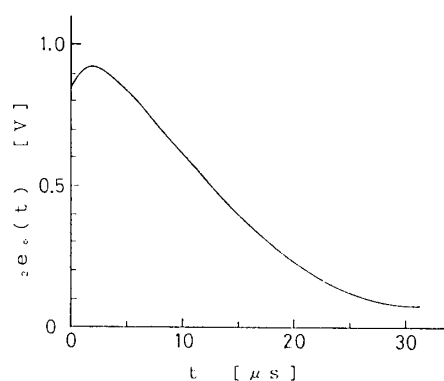
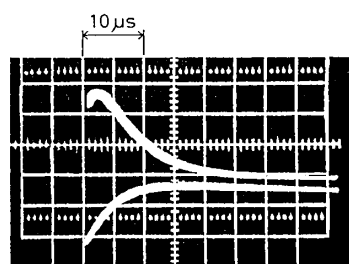
図 9 $e_{0m}(t) - t$ 

図 10 演算器の出力波形

するために 1 個の液滴を探針に衝突させた場合の出力電圧 ($e_0(t)$) の実測波形を撮ったのが図 10 である。上側の波形は演算器の出力電圧 $e_0(t)$ であり、下側の波形は演算増幅器の反転入力端子の電圧波形である。下測の波形は解析では演算増幅器を理想増幅器としているので求めているが、 $e_0(t)$ は図 9 とまず許容範囲内で同形の時間変化をしているとみてよからう。

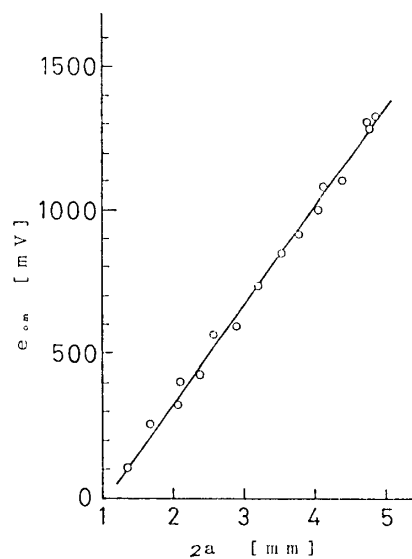
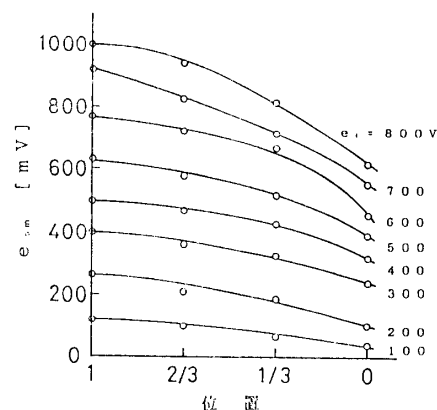
次に、液滴の半径 (a) を変えて、 e_{0m} との関係を探ったのが図 11 で、実験の範囲内で e_{0m} と a とは直線の関係にあることがわかる。この関係を式で示すと

$$e_{0m} = 700a - 370 \quad (18)$$

ただし ($0.7 \text{ mm} \leq a \leq 2.4 \text{ mm}$)

となり、近似式として便利である。

図 11 で直線を延長すると約半径 0.5 mm の所で e_{0m} が 0 となる。液滴が電荷をもっていれば原点がズレた直線になることが予想されるが、このズレは液滴電荷の原因にしては大きすぎる値であるようにも思われるが表 1 の半径 0.5 mm では丁度、当価電子個数は 10^8 個になる。これに対して 0.5 mm 半径の水滴内の分子の数はアボガドロ数より 1.75×10^{19} 個となり場合によってはこの程度の電荷は液滴の分離電荷として否定できないかもしれない。また他の原因としては白金線の表面で局部破壊放電が生じていることも考えられるが、現時点で原因を決定するデータがないので今後の

図 11 $e_{0m} - 2a$ 図 12 e_{0m} - 位置

調査によりたいと思う。

3.2 液滴の衝突位置の影響

モデルの項で述べたように、同一直径の液滴が探針に衝突した場合でも探針上の電荷密度が異なるために、衝突位置によって演算器の最大出力電圧 e_{0m} は変わってくるのが予想された。しかし、この現象は複雑で使いやすいモデルが作れないため実験による検討を行なった。図 12 は半径 1.35 ~ 1.4 mm の液滴に対して探針への印加電圧をパラメータとして、 e_{0m} と液滴の衝突位置の関係を示したもので、“1” は探針の先端を、“0” は終端を意味している。勿論、先端で最大出力となるが、ここは電気力線が集中し、環境条件によっては放電を発生する恐れもあるため避けなければならない。実際の特性で見ると、先端を避け約 1/4 程度の探針長を用いると、(約 20 mm を露出させることになる)、500 V 印加時のカーブから、衝突位置による誤差は 3 % となる。更に高精度の測定が要求される場合

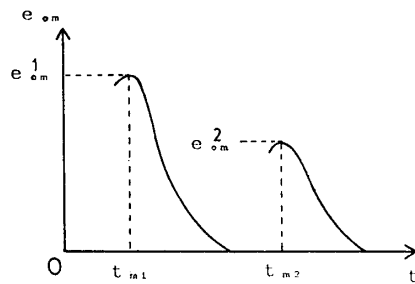
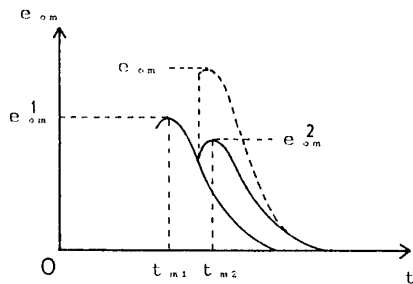


図 13 適切な時間間隔で生ずる衝突

図 14 短い時間間隔で生ずる衝突時の出力波形 (e_{om})

には露出長を短くする必要があるが、これは液滴の空間密度との関係で定めればよいので、図12より適正な露出長を求めることができる。

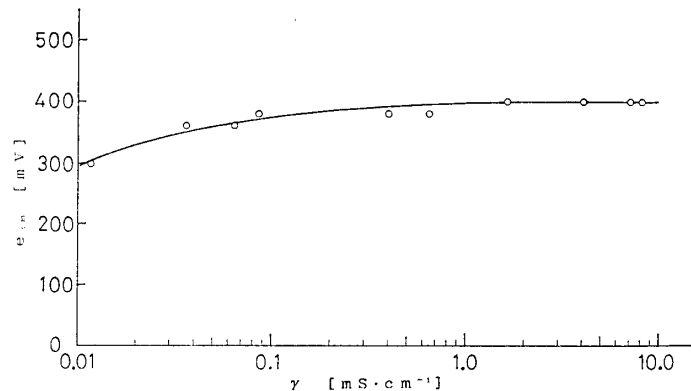
液滴の探針への衝突はランダムに生ずる。そこで、図13のように2つの衝突が適当な時間間隔で起きていれば問題はない。しかし、時間的に極く接近して液滴が衝突してくるときは、演算器の出力電圧は e_{om}^1 と e_{om}^2 とが重ねられた結果、図14の点線で示す e_{om} となる。ここでは始めの衝突により生じた e_{om}^1 の最大値を保持回路である時間、保持することを考えているので、当然、誤差となる。保持回路で最大値を保持したならば、可及的速やかに、検出回路を平衡状態に戻すように電子スイッチを附加し、制御することが必要である。

3.3 液滴の導電率の影響

液滴の導電率は本測定法に大きな影響をもたらす。

(8) 式が成立する範囲が正確な測定範囲であるが、導電率が余り低い値になると誤差を原理的に含むことになる。図15は $e_{om}-\gamma$ (mScm^{-1}) を実験的に求めたものである。が、 $\gamma < 0.3$ (mScm^{-1}) では液滴の半径が一定でも出力電圧 e_{om} は低下し始め、 0.01 (mScm^{-1}) では約75%出力になってしまう。

(8) 式の相似関係が急に成立するわけではないので、逆に、液滴の導電率をあらかじめ知っていれば補正は可能であろう。

図 15 $e_{om}-\gamma$

4. む す び

本論文は中国の北京化工学院で開発中の液滴粒度計測法を纏めたものである。実際には異相系中に生ずる複雑な現象をなるべく簡単なモデルに置き変えて、系の解析を進め、またモデル作りが容易でないところは直接、実験により変数間の関係を求めた。

その結果、最大出力電圧 (e_{om}) は液滴の静電容量に単に比例すると従来、思われていたのが、実は (8) 式の示すように液滴の抵抗に逆比例すると見ることができるといふ新しい結果を導いた。この抵抗と静電容量の関係は電磁気学の電流の場と静電場の相似性という極めて基本的な関係式で、この法則の成立する範囲では、これまでの常識通り、計測器の最大出力電圧は液滴の半径を正確に測定しうることが証明された。

しかし、液体の導電率と気体の導電率の間に大きな差がなくなってくると、相似則が成立しなくなり測定誤差となってくることを実験的にも立証した。したがって、この種の計測器の感度として $C_a/C_m \times E_t$ を感度として扱い得るのは相似性が保たれている範囲内に限られる。

今後は、液滴の粒度分布の測定を正確、迅速に行なうことが研究対象となるが、そのためには液滴の運動を統計的に扱うことになり、より精密な新しいモデルの開発が必要となる。

参 考 文 献

- 1) J. M. Geist, J. L. York and C. G. Brown: Ind. & Eng. Chem., 43—6
- 2) W. V. Pinczewski: Ph D. Thesis, Univ. of New South Wales, Australia (1973)
- 3) W. V. Pinczewski and C. J. D. Fell: Trans. Instr. Chem. Engs. 55 (1977)
- 4) J. A. Raper: Ph D. Thesis, Univ. of New South Wales, Australia (1979)
- 5) 小平: 物理数学, 岩波書店 (1948)
- 6) 黒川: アナログハイブリッド計算機, オーム社 (1968)