

論 文

流 体 の 帯 電 制 御

横 山 成 昭*, 高 橋 清*, 清 水 晃*

(1992年11月2日受理)

Electrostatic Charge Control of Fluids

Shigeaki YOKOYAMA,* Kiyoshi TAKAHASHI* and Akira SHIMIZU*

(Received November 2, 1992)

When fluids flow through pipelines, they are electrified by physical action. By applying this phenomenon to a charge control mechanism in a fluid flow system, the control of electric charging was attempted. This charge control mechanism is made of a fine tube of insulator, and when fluid passes through this fine tube at some velocity, it is electrified. In this equipment, by making the fine tube with a suitable material, and by changing flow velocity, the control of electric charging was carried out. Besides, in this equipment, in order to get flexible control, a microcomputer was incorporated. As the results of experiment, in the case of on-off control, there was the ripple of fluid charge of 10^{-6} C/m^3 , but in the proportional control having a controlling function, the control was able to be carried out at the ripple of $2 \cdot 10^{-8} \text{ C/m}^3$.

1. 緒 言

低導電率の液体等を生産工程で扱う工業において、搬送時に生ずる静電気による障害を防止する手段としては、一般に次のような方法が取られている。すなわち、工程における容器、ストレーナおよび配管などの搬送系路の材質およびその構造等を考慮し、発生する電荷量を少なくしつつ、生じた電荷を接地により放電させる方法である。しかし、これらの防止方法はいずれも積極的な方法とは言い難い。希な方法としては帯電防止剤を混入させる手法が取られているが、すべての試料に用いることは困難である。そこで、本研究はより積極的な方法として、流動帯電の現象を応用した帯電用のアクチュエータを作成し、それを制御系に組み入れることにより流体の帯電量を制御することを試みた。このアクチュエータは絶縁物質で作られたオリフィス形状のものであり、流体がこの間を通過する際に帯電する現象を応用している。本装置により、作動油を試料として実験を行った結果、帯電電荷量を $1 \sim 0.02 \mu\text{C}/\text{m}^3$ の脈動で除電することができたので以下にその研究について報告する。

キーワード：帯電制御、除電

* 芝浦工業大学電子工学科 (108 東京都港区芝浦 3-9-14)
Department of Electronic Engineering, Shibaura Institute of Technology, 9-14, Shibaura 3-chome, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

2. 帯 電 原 理

流体が流動する場合に生ずる帯電現象は、搬送路である管路の壁面、あるいは容器の壁との接触面の状態、および材質による影響を受けて変化する。しかし、工場等において設置されているように、定まった材質のプロセス系の管路等における流動帯電の要因は、温度およびそれに依存する粘度、速度であるが、主な要因は速度によるものと考えられる。そこで、本実験では、帯電現象を示す材質で作成した管路を流体の搬送系路に挿入し、それを流れる流体の速度を変化させることにより、流体の持つ帯電電荷量を所要の値に制御することに着目した。

3. 装置および測定原理

3.1 帯電電荷量の測定

本装置で使用した電荷量検出器のファラディケージは、基本的には金属製の二重円筒から構成されており、内筒と外筒は絶縁された構造となっている。この導体で作られている内筒の中に帯電体を入れ、帯電体からの電気力線が外にもれない構造とすれば、帯電体の総電荷量は、ファラディケージの静電容量と発生電圧より測定可能となる。なお、この原理により、内筒に入れられる試料については、その形状は問わないため、流体の帯電電荷量の測定も可能である。図1に、管路を流れる流体の帯電量を連続的に計測する目的で作成したファラディ

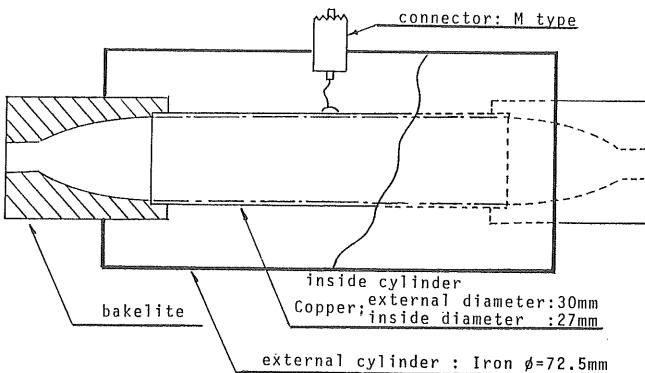


図1 ファラディケージの構造
Fig. 1 Structure of the Faraday cage.

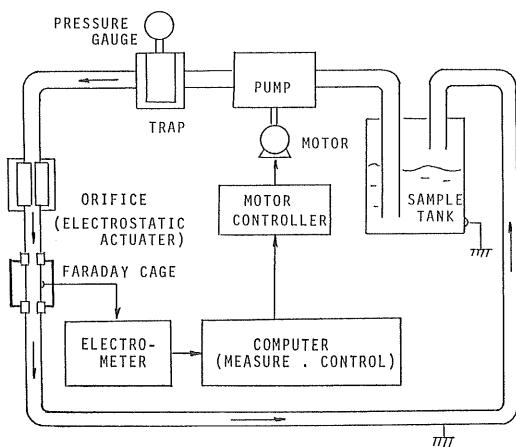


図2 装置の構成
Fig. 2 Construction of the system.

ケージの構造を示す。

3.2 帯電制御

先述のごとく、この手法により制御を行うためには、管路の帯電特性を調べるために帯電電荷量の測定系と、流速を変化させるための制御系を備えた装置が必要となる。図2に装置の構成図を示す。

いま、帯電電荷量を Q_m として、帯電特性を表わす式を式(1)で示す。

$$Q_m = f(v \cdot \nu) \quad (1)$$

v : 流体の移動速度

ν : 流体の粘度

また、この関係を用いた帯電制御系の帯電量検出系により得られた結果を元に、流速 v を制御する場合、その関係を式(2)で示す。

$$v = g(Q_m) \quad (2)$$

ここで、 $f(v \cdot \nu)$ がすでに知られているならば、目標とする帯電電荷量を Q_0 、そのときのパラメータを v_0 、 ν_0

とした場合、この制御系は流速を次式のごとく設定することができる。すなわち、

$$v = g[v_0 \cdot \nu_0] \quad (3)$$

ただし、流速設定の関数 $g(Q)$ は式(4)で表わされるものとする。

$$Q_0 = f[g(Q_0) \cdot \nu_0] \quad (4)$$

ここでパラメータである v 、 ν が共に知られており、かつ外乱がないものとすれば、この系は所要の帯電電荷量 (Q_0) を得るために、流速を最適値 v_0 にセットする。しかし、実際に制御対象とする系は、不確定な要素を多く含むため、先に示した要素を単純な形で表わし、上述のごとく帯電制御を行うことにより、良い結果を得ることは容易ではない。そこで、本研究では帯電電荷測定系と試料流体の流速制御系の間に、制御用コンピュータを組み合わせた帯電特性測定系を備えることにより、帯電電荷量制御の向上を計った。図3に帯電特性の計測、および制御を行うために試作した制御用コンピュータの構成を示す。このコンピュータは電位計とのインターフェイスを備えており、直接データを取り込むことができると共に、内部に帯電特性測定プログラムを内蔵しており、測定データは通信回線により外部へ転送、セーブすることができる。なお、制御用としては、定容積ポンプの流量制御を行うことができる。この実験に用いたCPUはZ80である。図4に試料流体を帯電させるために用いた細管部(オリフィス)の外観を示す。この細管は、直径13mm、高さ10mmの円柱材の中心に穴を開けたものである。なお、実験には、真鍮、ベークライト、デルリン(ポリアセタール)、テフロン、アクリル、A.B.S、P.V.Cの7種類の材質を用いた。また、試料流体としては、軽油、メチルアルコール、作動油(共石HYDLUX46)の3種を試料として用いたが、帯電特性の実験の結果、前者2つの試料については、ほとんど帯電が見られなかったた

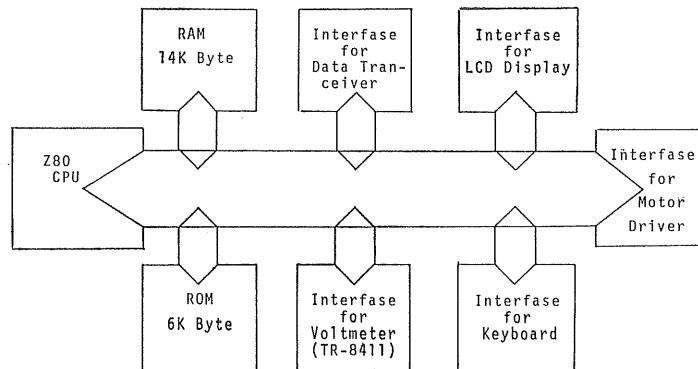


図3 制御用コンピュータ

Fig. 3 Control computer.

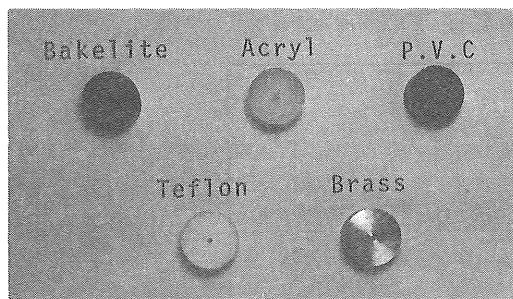


図4 細管の外観

Fig. 4 Appearance of the capillary tube.

め主に作動油を試料として実験を行った。なお、試料流体の粘度は本研究室で従来より開発を進めている共軸二重円筒法¹⁾による、改良型レオメータ²⁾で測定した。図5に用いた作動油の動粘度特性を示す。

4. 実験結果

4.1 帯電特性

図6に先述の細管を用い、その材質による帶電特性の変化の測定結果を示す。試料流体は作動油であり、細管の径は0.9mm、長さは10mmである。実験の結果より、使用した細管材質の中で流速の増加と共に正に帶電するものはテフロンで、他の材質はすべて負の帶電特性を示した。また、帶電電荷量はアクリルが最も多く帶電することが確かめられた。なお、文献³⁾によると、実験に用いた材質の帶電列は、テフロン、P.V.C.、ペークライト、アクリルとなっており、実験結果のテフロンとアクリルの特性は、その順位で文献と一致することが確かめられた。図7に帶電特性の温度依存性の結果を示す。細管の材質はアクリルで、その内径 ϕ は0.9mm、長さ l は10mmである。実験結果より温度の上昇と共に帶電電荷密度が増すが、これは温度上昇に伴う導電率の上昇

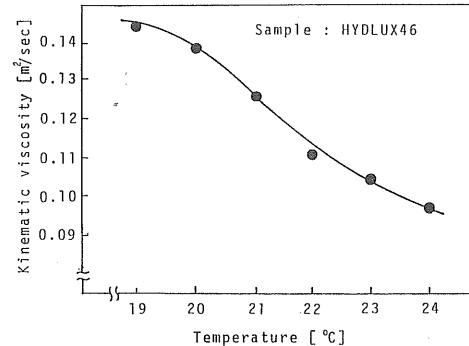


図5 試料流体粘度の温度特性

Fig. 5 Temperature characteristics of the sample liquid viscosity.

よりも、粘性の低下等の影響の方が、大きいためと思われる。図8に細管の内径および長さを変化させた場合の帶電特性を示す。実験結果より、径は小さいほど、長さは長いほど帶電量は増加するが、これは単位体積当たりの流体が細管に接する面が増大することに起因すると思われる。

4.2 帯電制御

図6に示した帶電特性結果を用いて帶電制御を試みたので以下に述べる。制御方法は帶電量を計測し、その値をもとに試料の流速 S （流量）を変化させる手法とした。なお、制御方式は、ON-OFF制御、目標値追従型制御、制御閾数を持つ比例制御の3通りで、これらについて実験を行った。試料流体は共石HYDLUX46を用い、細管は帶電量の最も大きいアクリル材として、形状は $\phi: 0.9\text{ mm}$, $l: 10\text{ mm}$ とした。図9にON-OFF制御のアルゴリズムを示し、図10に目標値追従型制御のアルゴリズムをそれぞれ示す。なお、これらの制御方法は次のとくである。ON-OFF制御は、目標とする帶電電荷量と制御結果の測定値との偏差によって、制御量である流

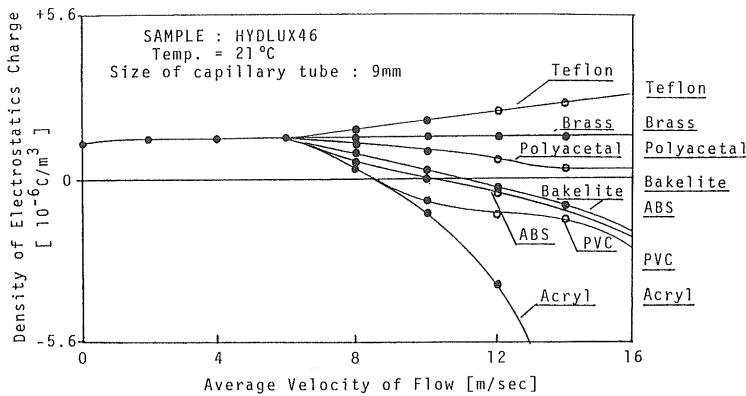


図6 細管の材質による帯電特性

Fig. 6 Characteristics of the electrostatic charge of the different material capillary tube.

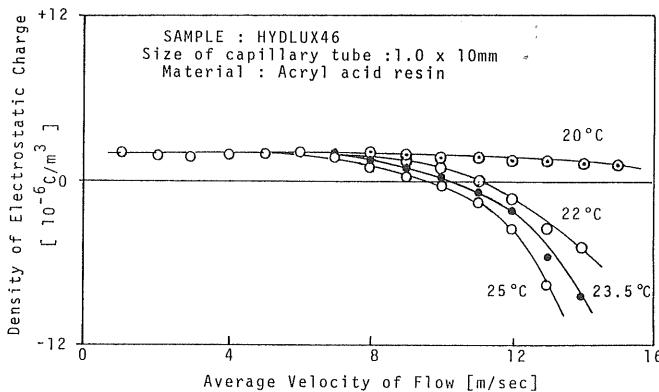


図7 帯電の温度特性

Fig. 7 Temperature characteristics of the electrostatic charge.

速を最大の ON と最小の OFF にする方法である。また、目標値追従型制御と名付けた手法は、偏差を打消すまで流速を一定の大きさ (dS) で逐次増加させる方法である。従って、偏差の大きさにより (dS) を積み重ね、偏差を打ち消すための制御量を得る方法である。なお、この定量値を逐次増加することなく、最大の制御量を与えると、先述の ON-OFF 制御となる。以上のことから、上述の制御方法の特徴をそれぞれ示すと次のようになる。ON-OFF 制御は、制御量が大きいために整定時間を速くできるが、整定後のハンチングが大きくなるため、出力のリップル成分を軽減させるには、適当な積分要素（平滑用のフィルタ）を挿入する必要がある。また、目標値追従型制御は、上述の積分要素を ON-OFF 制御に含ませた構造となるため、速応性よりも出力に含まれる変動成分を小さくする目的に適する手法である。そこで、上述の 2 つの方法の長所、短所を補った形式となる制御関数を持つ比例制御をこの系に試みた。この方

式は、先に述べた 2 方式に比較すると、構成上は複雑となるが、実験において良好な結果が得られることが期待できる制御方法である。この制御関数を持つ比例制御は、先の手法を発展させたものと言えるが、偏差から dS を算出する関数を持ち、かつその関数の特性が次に述べるごとく非線形である点が異なる。この関数はあらかじめ測定結果より求め、コンピュータ内のメモリに表としてストアされている。そこで、制御量である流速 S は、この表により帶電電荷量と目標値との偏差に応じて変化することになる。この動作から、表としてストアされている関数を適切に設定することにより、最適な制御を行うことができる。また、メモリ内にストアされている制御関数は、制御結果をもとにして改変することができる。以上のことから、この手法は、学習機能を持つ、非線形要素を含む比例制御という特徴を持つことになる。図 11 に、制御関数を持つ比例制御のアルゴリズムを示す。なお、

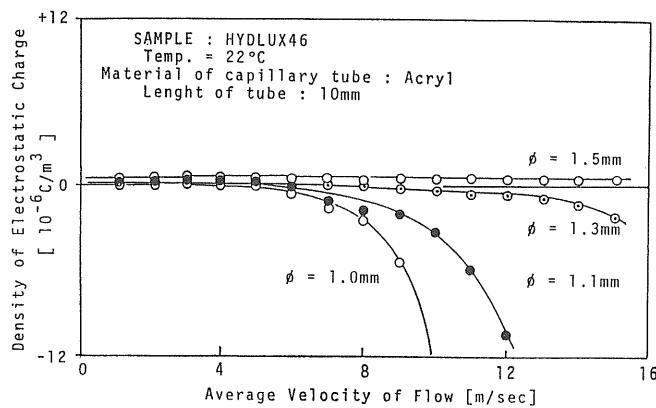
図 8-(a) 細管径による帶電特性。図中 ϕ は細管径を示す。

Fig. 8-(a) Characteristics of the electrostatic charge by the capillary tube diameter.

The symbol ϕ shows the diameter of the tube.

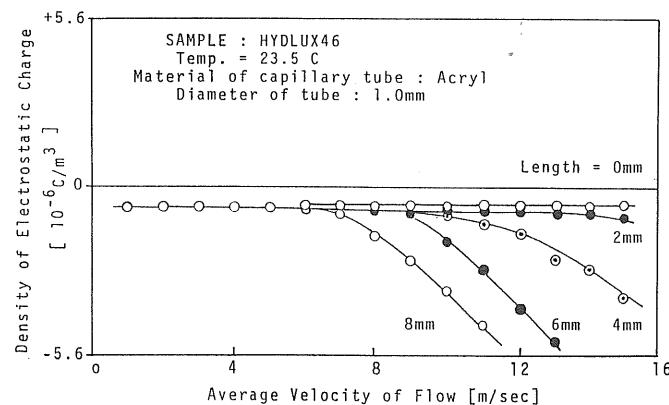


図 8-(b) 細管長による帶電特性

Fig. 8-(b) Characteristics of the electrostatic charge by the capillary tube length.

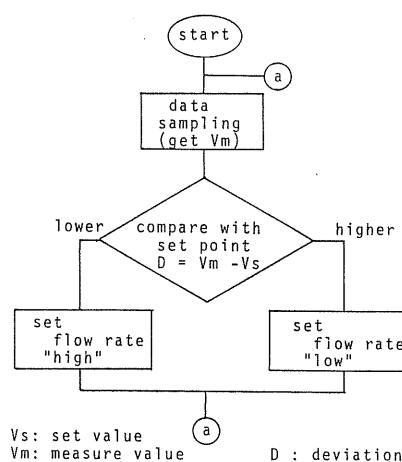


図 9 ON-OFF 制御のアルゴリズム

Fig. 9 Algorithm of the on-off control.

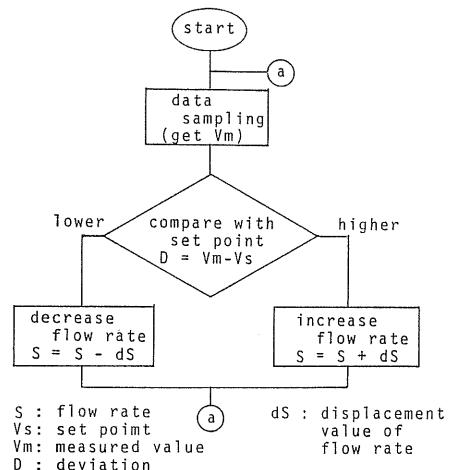


図 10 目標値追従型制御のアルゴリズム

Fig. 10 Algorithm of the object follow type control.

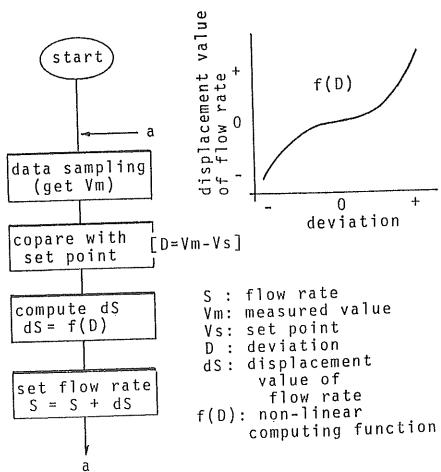


図 11 制御関数を持つ比例制御のアルゴリズム
Fig. 11 Algorithm of the proportional control with control function.

図中に示されているグラフは、偏差信号より制御量を求めるための制御関数の概略であり、このような関数に従って制御量がoutputされる。

4.3 帯電制御結果と考察

図 12 に ON-OFF 制御による帯電制御結果を、図 13 に目標値追従型制御による結果をそれぞれ示す。試料流体には作動油を用い、細管はアクリル製 ($\phi : 0.9 \text{ mm}$, $l : 10 \text{ mm}$) を用いた。両者を比較すると、ON-OFF 制御は大きな制御量を与えるため、目標値に到達するのに要する時間は短いが、リップル、外乱に対する系の変動特性は、追従型制御方式の方が優れている。これは ON-OFF 制御では、単に偏差によって制御信号を加えているのに対して、追従型では、前の制御値を記憶しておき、それに dS だけ修正を行う方式であるためである。なお、図中大きなアンダーシュートは、管路の途中にあるトラップが所定の圧力まで上昇するのに要する時間の影響である。そこで、これらの欠点を補う目的で、先に

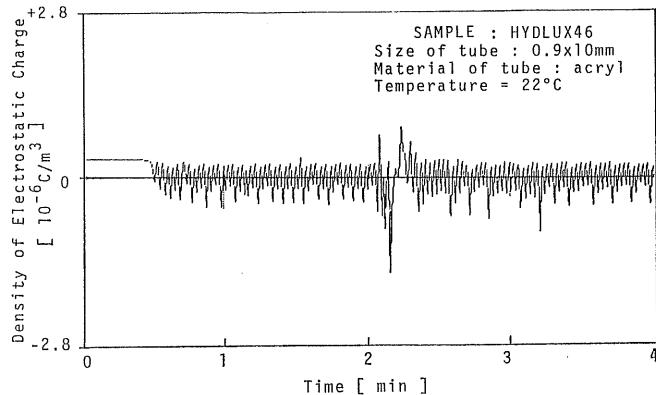


図 12 ON-OFF 制御による帯電制御結果
Fig. 12 Results of the electrostatic charge control by the on-off control.

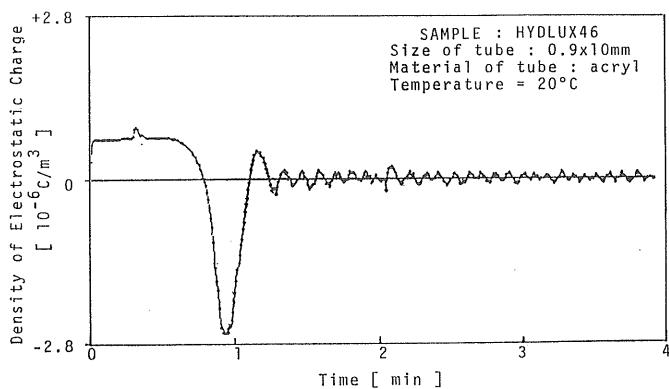


図 13 目標値追従型制御による帯電制御結果
Fig. 13 Results of the electrostatic charge control by the object follow type control.

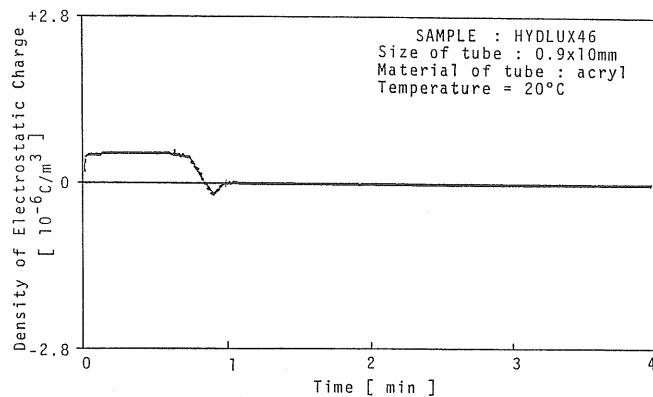


図 14 制御閾値を持つ比例制御による帶電制御

Fig. 14 Results of the electrostatic charge control by the proportional control with control function.

示した2つの制御方式を発展させた制御閾値を持つ比例制御によって制御を行った。図14にその結果を示す。結果は、図に示されたごとく良好な帶電制御特性を得ることができた。これは、この制御方式が制御装置中に非線形要素を含ませたために、先に述べたON-OFF制御の特徴と、追従型制御の dS を小さくした場合の両方の特徴を合せ持つためである。なお、本装置では制御用にコンピュータを組み入れているため、非線形要素をメモリ内の内容によって作成しているが、制御装置をアナログ回路で構成する場合には、この非線形要素はダイオード等の非線形素子と演算増幅器とを組み合わせることにより、容易に実現することができる。

5. 結 言

流体に生ずる電荷を制御する手段として、流動帶電による流体の帶電量を制御する装置と、幾つかの試料についての実験結果について述べた。なお、装置の構成要素に制御用コンピュータを組入れることにより、測定と制御を柔軟に行うことを可能とし、幾つかの手法により帶電制御を行った。実験の結果は、簡単な構造のアクチュ

エータを用いた方法により、目的とする帶電（除電）の制御が可能となった。また、先述のように、幾つか試みた制御方法のうち、特に制御閾値を持たせた比例制御は、このような帶電制御に有用な手法であることが確かめられた。以上のように本装置は、流体の帶電装置、または除電装置としてだけではなく、静電気現象の基礎的な研究面への計測器としても活用できると思われる。なお、目標とする帶電量に対しては、細管部に適切な材質を選ぶことにより、更に幅広い用途に用いることも可能である。

終りにあたり、本実験を行うに際し、御協力いただいた学部卒研生、中村光治君に謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 川田裕郎：粘度，p. 99，コロナ社（1978）
- 2) 高橋 清、横山成昭、藤平文雄、廣瀬直哉：応用物理，52 (1983) 607
- 3) 高分子学会編：静電気ハンドブック，p. 71，地人書館（1978）