定在波円環形電界カーテンの諸特性— 実験的研究

増 田 閃 一
松 本 陽 一
阿久津 顕 右

1. ま え が き

すでに報告したとおり、一連の不平等交番電界列により形成される電界カーテンは、帯電した粉体粒子に対して電気力学的に一種の無接触的な障壁を形成し、粒子を保持したり運搬したりする働きをもつ。^{(1)~(2)}このような電界カーテンのうち、特に単相交番電圧を印加することによって形成される定在波電界カーテンについてその電気力学的特性の理論的解析を行なったところ、定在波円環形電界カーテン(第1図)は、帯電粉体粒子に対して一定の粒子選別特性をもつことが明らかになった。^{(4)~(6)}そこで、筆者らは引き続きその実験的検証を行なった結果、上記理論選別特性が実験的にも妥当性を有すること。したがって、この理論特性を導く前提となった定在波電界カーテンの電気力学的阻止力に関する基本式〔次節(1)~(3)式〕およびその計算方法^{(4)~(6)}自体もまた妥当性を有することを確認することができた。

このような粒子選別特性は、粉体の粒径による分別(分級)とか、粒子ビームの形成、制御などに応用する可能性がある。

本論文は上記検証実験の結果に関する報告である。

2. 定在波円環形電界カーテンの性質

定在波円環形電界カーテンとは、第1図のように同軸に等間隔で配設した無限個の円環電極を一つおきに

第1図 円環形電界カーテン

Fig. 1. Electric curtain of ring-type.

接続して二組に分け、これに単相交番電圧を印加することによって形成されたところの円筒状の不平等交番電界面を指す。

ところで、一般に定在波電界カーテンの帯電粒子に対する粘性媒質中での電気力学的阻止力 F_e は、次のように定式化される。⁽²⁾⁽³⁾

$$F_e = -\text{grad } \varphi_e = -K[(\text{grad})_b(f^2)] \dots (1)$$

ただし、

$$\varphi_e = K b f^2 = \text{閉じ込めポテンシャル} \dots (2)$$

$$K = \frac{q^2 V^2}{4 m \omega^2 \{1 + (6 \pi \eta a / m \omega)^2\} b^3} \dots (3)$$

$$= \frac{q^2 \zeta^2 E_{\max}^2}{4 m \omega^2 \{1 + (6 \pi \eta a / m \omega)^2\} b} \dots (4)$$

ここに、 $m(\text{kg})$ 、 $a(\text{m})$ 、 $q(\text{C})$: 粒子の質量、半径、帯電量、 ω : 電源角周波数(s^{-1})、 $\eta(\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2)$: 空気粘性抵抗、 $E(\text{V}/\text{m})$: 電界(波高値)、 $V(\text{V})$: 印加電圧(波高値)、 $b(\text{m})$: 隣接電極表面間最短距離、 $E_{\max}(\text{V}/\text{m})$: 電極表面上の最大電界強度、 $\zeta = (V/b)E_{\max}$: 電界利用率、 $f = E/(V/b)$: 規格化電界、 $(\text{grad})_b$: b

Characteristics of the Standing Wave Electric Curtain of Ring Type—Experimental Study. By S. MASUDA, Member, Y. MATSUMOTO, Associate & K. AKUTSU, Associate (Faculty of Engineering, University of Tokyo)

増田閃一: 正員, 東京大学工学部
松本陽一: 准員, 東京大学工学部
阿久津顕右: 准員, 東京大学工学部

で規格化した座標系 $(r/b, z/b)$ における grad

(1), (2)式において, f^2 は規格化阻止ポテンシャル, $-(\text{grad})_r(f^2)$ は, 規格化阻止力と呼ばれ, 電極の寸法に関係なく, そのパターンのみで定まる位置 $(r/b, z/b)$ の関数である。また, K は物理パラメータと呼ばれる。⁽⁶⁾

第2図～第4図は, それぞれ代用電荷法⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾による電界計算に基づいて求めた定在波円環形電界カーテンの規格化された阻止ポテンシャル, 半径方向阻止力, 軸方向阻止力および絶対阻止力の規格化された円筒座標系における分布の一例で, パターンパラメータ $D : d : b = 15 : 4 : 6$ (第1図参照) の電極系に対するものである。⁽⁶⁾ 第2図において V_p は阻止ポテンシャルの谷, P_{pz} および P_{pr} は峠 (鞍点), W は壁を示す。円環壁群の中に, 峠と谷をもつ周期的な閉じ込め

第2図 規格化閉じ込めポテンシャル f^2 の分布

Fig. 2. Distribution of normalized confinement potential f^2 .

(第2図の場合)

第3図 半径方向の規格化閉じ込め力 $-\partial f^2/\partial(r/b)$ の分布

Fig. 3. Distribution of normalized confinement force in r -direction, $-\partial f^2/\partial(r/b)$.

(第2図の場合)

第4図 軸方向の規格化閉じ込め力 $-\partial f^2/\partial(z/b)$ の分布

Fig. 4. Distribution of normalized confinement force in z -direction, $-\partial f^2/\partial(z/b)$.

ポテンシャルの廊下が存在することがわかる。第3図は円環群の内面に沿って形成される半径方向閉じ込め力の壁の存在をよりはっきりと示しているとともに, 電極ギャップ中央部に半径方向閉じ込め力の峠 (鞍点) ができていることを示している。この方向の実際の閉じ込め力 F_{er} は(1)式から明らかなとおり, 図に示した規格化閉じ込め力に物理パラメータを乗ずることによって求められる。もし粒子に働く半径方向の外力 F_{er} が, 上記鞍点 P_{fr} における半径方向閉じ込め力 $(F_{er})_c$ より大きい場合は, 帯電粒子は峠 P_{fr} をこえて外部に逸出する。第4図から軸方向の閉じ込め力は常に円環中心に向いており, かつ軸方向閉じ込め力は閉じ込めポテンシャルの峠と谷の間に峠 (鞍点) P_{fz} を有することがわかる。もし粒子に働く軸方向の外力 F_{ez} が, 上記鞍点における軸方向閉じ込め力 $(F_{ez})_c$ より大きくかつ $(F_{er})_c > F_{er}$ であれば帯電粒子は円環群の中を移動することができる。また, $(F_{ez})_c > F_{ez}$ であれば粒子は谷 V_p 付近にトラップされる。これらのことから定在波円環形電界カーテンは粒子の帯電量や直径を選別する特性をもっていることがわかる。そしてこの特性は上記 $(F_{er})_c$ および $(F_{ez})_c$ の外力 F_{er} , および F_{ez} に対する大小関係に左右されることから, 前二者を半径方向および軸方向の臨界閉じ込め力と呼ぶこととする。

3. 粒子選別特性

いま, 上記鞍点 P_{fz} における軸方向規格化閉じ込め力を

$$\phi_z = -[\partial f^2/\partial(z/b)]_{P_{fz}} \dots \dots \dots (5)$$

また鞍点 P_{fr} における半径方向規格化閉じ込め力を

$$\phi_r = -[\partial f^2/\partial(r/b)]_{P_{fr}} \dots \dots \dots (6)$$

とすると, 軸方向および半径方向の上記臨界閉じ込め力はそれぞれ $(F_{ez})_c = K\phi_z$, $(F_{er})_c = K\phi_r$ となり, 外力 F_e の作用下において, 円環形電界カーテン内に閉じ込められた粒子は, 次のいずれかの挙動をとるはずである。⁽⁶⁾

- (i) $K > F_{ez}/\phi_z$: 円環内にトラップされる。
- (ii) $K < F_{er}/\phi_r$: 円環のギャップより逸出する。
- (iii) $F_{er}/\phi_r < K < F_{ez}/\phi_z$: 円環群の内部を通過しう。

ところで, (3), (4)式から明らかなとおり, 物理パラメータ K は粒子の質量 m , 半径 b , 電荷量 q を含むので上記の関係(i)～(iii)は粒子のこれらのパラメータ m, a, q に基づく選別を可能ならしめることとなる。ただし, その選別特性はさらに m, a, q 同志の相互関係に依存する。同一組成の粒子ならば $m \propto a^3$ と

第 5 図 重力を外力として利用する円環形電界カーテンによる電荷量選別

Fig. 5. Charge filter based on ring-type electric curtain with gravity reference.

なり、もしさらに a が均一（単分散粒子）ならば、粒子電荷 q の大小のみによる選別が行なわれる。また、 a が不均一であっても、粒子の電荷がコロナ放電により行なわれる場合には $q \propto a^2$ となり、⁽⁷⁾ 粒径のみによる選別が可能となるはずである。

本実験においては試料として単分散に近い石松子粒子を用いることとし、さらに円環形電界カーテンを第 5 図に示すように水平に対し 45° の角度で傾けることにより、外力として軸方向、半径方向とも相等しい重力の分力 $F_{er} = F_{ez} = mg/\sqrt{2}$ を利用することとした。この場合の粒子の電荷量選別特性は上記の (i), (ii), (iii) に対応して

(1) 電極内部にトラップされる場合

$$q \geq \sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_z}/V \quad \dots\dots\dots (7)$$

(2) 電界カーテン内を通過してくる場合

$$\sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_r}/V \leq q \leq \sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_z}/V \quad \dots\dots\dots (8)$$

(3) 電極ギャップより漏れる場合

$$q \leq \sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_r}/V \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$A = 1/[4b^3 m \omega^2 \{1 + (6\pi \eta a/m \omega^2)\}] \quad \dots\dots\dots (10)$$

で、この場合円環形電界カーテンは条件 $\phi_r > \phi_z$ を満たすように設計されているものとする。第 6 図は、いろいろのパターンパラメータ $d/D, b/d$ の円環形電界カーテンについて計算した ϕ_z, ϕ_r を示す。⁽⁶⁾ 同一の d/D に対する ϕ_r, ϕ_z の曲線の交点より左方に b/d がくするように電極を設計すれば、上述の条件 $\phi_r > \phi_z$ が満たされ、(8) 式の条件より、円環内を通過しうる粒子の最大電荷量 $q_{\max}$ および最小電荷量 $q_{\min}$ は以下のように規定される。

$$q_{\max} = \sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_z}/V \quad (C) \quad \dots\dots\dots (11)$$

第 6 図 半径方向の峠における半径方向規格化閉じ込め力と軸方向の峠における軸方向規格化閉じ込め力

Fig. 6. Normalized confinement force in r -direction, ϕ_r , at radial pass P_{fr} and that in z -direction, ϕ_z , at axial pass P_{fz} for various configuration parameters d/D and b/d .

$$q_{\min} = \sqrt{mg/\sqrt{2} A \phi_r}/V \quad (C) \quad \dots\dots\dots (12)$$

いま、空気中（粘性係数 $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ (N} \cdot \text{s/m}^2\text{)}$ ）で、電源電圧 $V \text{ (kV)}$ （波高値）、電源周波数 50 Hz 、隣接電極間最短距離 $b \text{ (mm)}$ という条件のもとで、試料粉体として石松子粒子 ($m \approx 1.5^{10-11} \text{ kg}$, $a \approx 15 \mu$) を用いて実験する場合には、(11), (12) 式は次のようになる。

$$q_{\max} = \frac{1}{1.189} \frac{\sqrt{b^3}}{V} \sqrt{\frac{1.92 \times 10^{-15}}{\phi_z}} \quad (C) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$q_{\min} = \frac{1}{1.189} \frac{\sqrt{b^3}}{V} \sqrt{\frac{1.92 \times 10^{-15}}{\phi_r}} \quad (C) \quad \dots\dots\dots (14)$$

第 7 図は、上式中の $\sqrt{1.92 \times 10^{-15}/\phi_z}$ と $\sqrt{1.92 \times 10^{-15}/\phi_r}$ の値をいろいろなパターンパラメータ d/D および b/d をもつ定在波円環形電界カーテンについて計算した結果を示す。

第 7 図 $\sqrt{1.92 \times 10^{-15}/(\text{grad})_b (f^2)}$ の値

Fig. 7. Value of $\sqrt{1.92 \times 10^{-15}/(\text{grad})_b (f^2)}$

第 8 図 電荷バンドパスフィルタの原理

Fig. 8. Principle of particle charge band-pass-filter.

4. 粒子選別特性の検証実験

種々の寸法および形状の円環形電界カーテンを製作し、それぞれについて理論式(13)、(14)が実験的になりつつどうかを検証した。実験の原理および実験装置の写真を第8図、第9図に示す。図の示すように帯電粉体粒子供給部において発生する帯電石松子を円環形電界カーテンよりなる粒子選別部Cに供給し、これを通過した粒子の帯電量を測定部Dによって測定しこれと電界カーテン印加電圧 V との関係調べる。供給部Fは2本のテフロン被覆電線(銅線外径1.6mm, 全外径2.4mm)を円筒面に沿ってらせん状に巻き、これに単相交番電圧を印加して、らせん状の定在波電界カーテンを形成し、この中に石松子のはいた、電気抵抗、接触帯電効果の両者が高いテフロン円筒(内径5mm, 長さ65mm, 肉厚0.5mm)を入れ、電動機Mで、巻き線のらせんの進む方向にゆっくりと回転させる構造のものである。この際、石松子粒子はテフロン内壁との接触帯電および石松子相互の接触帯電で電荷を帯び、電界カーテンの反発作用で逐次表面からはく離して空間に飛び出し、無接触的にあるいは内壁との衝突をくり返しなが、軸方向にゆっくり輸送

第 9 図 粒子の電荷量選別実験装置

Fig. 9. Experimental apparatus for particle charge band-pass-filter.

第 10 図 帯電粒子供給装置(第8図)から供給された粒子の電荷量分布

Fig. 10. Charge distribution of particles out of charged particle feeder of Fig. 8.

され出口より電荷を帯びてでる。この際、3本のらせん状電極を用い三相交番電圧を印加すれば、電動機を用いなくても出口から帯電粒子が噴出するが、その速度が大きすぎて本実験には不向きであった。上記供給装置のテフロン円筒出口よりでてくる石松子粒子の帯電量を交番電圧法で測定したところ、第10図に示すようにほぼ $2.5 \times 10^{-16} \text{C}$ を中心として分布しており、接触帯電であるにもかかわらずきわめて高い電荷量(コロナ放電による理論帯電量の約半分)を有していることがわかった。粒子選別部Cは第5図に示すように単相交番電圧を印加した数個の円環電極よりなる定在波円環形電極で、これを水平に対して 45° 傾斜してある。この部分はカセット式に構成し種々のパターンパラメータを有する電極系を自由に交換して実験ができるようにした。(第9図)粒子電荷量測定部Dは交番電圧を印加した平行平板電極よりなり、その間に帯電粒子を落下させ、その正弦波振動を写真撮影して振幅から粒子の電荷量を読みとる、いわゆる交番電圧法を用いている。第1表には実験に用いた円環電極の形状、寸法(D, d, b)と、おのおのに対する特性値 ϕ_z, ϕ_r , ならびに $q_{\max}, q_{\min}$ を掲げる。これらの円環形電界カーテンを用いて行なった粒子の電荷量選別実験の結果を第11図(a)~(e)に示す。

これらはすべて通過粒子の電荷量 q と、印加交番電圧 V との関係を測定したもので、それぞれの電圧に対する q の測定値の範囲と平均値を与えた。図には同時に最大電荷量 $q_{\max}$, 最小電荷量 $q_{\min}$ の理論曲線(いずれも直角双曲線)をも併記した。二つの曲線の間の部分が通過粒子の理論電荷量範囲にあたる。第12図の写真は選別された結果、ある幅の電荷量をもった粒子が、平行平板電極中をほぼ様な振幅で振動しつつ落下する様子を示す。これらの実験結果は、理論値ときわめてよく一致しており、したがって、理論選別特性

第 1 表 実験に用いた円環電極の寸法と特性値

Table 1. Size and characteristic figure of testing ring electrodes.

No. (Fig)	$d/2 \times 10^{-3}$ (m)	$b \times 10^{-3}$ (m)	$D/2 \times 10^{-3}$ (m)	b/d	d/D	ϕ_z, ϕ_r	$q_{\max}, q_{\min}$ の理論式 $\times 10^{-14}$ (C), ただし V は (kV)
1 Fig. 11. (a)	2.4	7.2	7.59	1.5	0.32	ϕ_z 0.49 ϕ_r 0.47	$q_{\max} = 3.216/V$ $q_{\min} = 3.283/V$
2 Fig. 11. (b)	2.4	3.4	7.9	0.7	0.32	ϕ_z 0.05 ϕ_r 0.67	$q_{\max} = 3.269/V$ $q_{\min} = 0.893/V$
3 Fig. 11. (c)	1.0	4.0	5.13	2.0	0.20	ϕ_z 0.16 ϕ_r 0.69	$q_{\max} = 2.331/V$ $q_{\min} = 1.122/V$
4 Fig. 11. (d)	1.0	5.0	5.13	2.5	0.20	ϕ_z 0.32 ϕ_r 0.59	$q_{\max} = 2.304/V$ $q_{\min} = 1.697/V$
5 Fig. 11. (e)	2.1	8.7	9.14	1.96	0.23	ϕ_z 0.36 ϕ_r 0.56	$q_{\max} = 4.899/V$ $q_{\min} = 3.913/V$

第 11 図 電荷量選別特性実験の結果

Fig. 11. Charge filtering characteristics for lycopodium particle.

第 12 図 平行平板中における選別された粒子の振動

Fig. 12. Oscillation of filtrated particles with a uniform AC field.

(7), (8)式とその前提となる閉じ込め力の(1)~(4)式の妥当性を実証しているものと判断される。一般的に最大電荷量 $q_{\max}$ について、実験値のほうが理論値よりも大きめにでているのは、電極中心部にトラップされ蓄積された $q_{\max}$ より大きな電荷量をもつ粒子群が、相互にクローン反発力を及ぼしあって本来ならトラップされるはずの粒子が谷から押し出され通過したためと考えられる。

6. む す び

定在波電界カーテンの一種である定在波円環形電界カーテンの理論的粒子選別特性の検証実験単分散に近いほぼ球形の石松粒子で行なった。その結果、円環形電界カーテンを通過する粒子の電荷量は、理論値とき

わめてよく一致し、定在波円環形電界カーテンが単分散球形粒子に対して、電荷量の Band-pass-filter としての特性を有することが確認されると同時に、選別理論の前提をなすところの、すでに報告した定在波電界カーテンの閉じ込め力(阻止力)の式自体の妥当性をも実証することができた。この原理は粉体の分級や粉体ビームの形成、制御に有力な一手段を提供する可能性のあるものと期待される。

本研究に関して、絶大なる助力を賜った東京大学工学部 石田謙吾氏に心から感謝の意を表明する次第である。

(昭和 46 年 9 月 16 日受付, 同 47 年 7 月 10 日再受付)

文 献

- (1) S. Masuda, K. Fujibayashi & K. Ishida: Electric Curtain zum Einsperren und Fördernelektrisch aufgeladener Staubwolken, Advances in Static Electricity, Vol. 1—Proc. of 1st Int. Conf. on Static Electricity, Vienna 1970—pp. 398 (1970)
- (2) S. Masuda, K. Fujibayashi & K. Ishida: Elektrodynamisches Verhalten aufgeladener Aerosolteilchen im inhomogenen Wechselfeld und seine Anwendungsöglichkeiten in der Staubtechnik, Staub-Reinhaltung der Luft 30 (1970) Nr. 11, S. 449 (1970)
- (3) 増田, 他: 電気学会論文誌, 92-B, 9 (昭 47-9)
- (4) 松本: 粘性媒質中における帯電粉体粒子の電気力学, 東京大学工学部電気工学科修士論文 (昭 46-3)
- (5) 増田・松本・伊藤: 昭46電気学会全国大会, No. 820
- (6) 増田・松本: 定在波電界カーテンの理論的諸特性 (電学誌投稿中)
- (7) H. J. White: Industrial Electrostatic Precipitation, p. 135, (1963) Addison-Wesley Pub. Co., Inc., London
- (8) 増田・阿久津: 昭 46 電気学会全国大会 No. 822
- (9) S. Masuda: Electric Curtain for Confinement and Transport of Charged Aerosol Particles, Conference Paper for Albany Conference on Electrostatics, Albany, N. Y., June 8, 11 (1971)
- (10) 増田・松本: 代用電荷法による定在波電界の解析 (電学誌投稿中)