

電気集塵性能に及ぼす電源の影響 (その 2) 印加電圧脈動分が粒子帯電に及ぼす影響

飯 島 歩*

(1986 年 10 月 13 日受理)

Effects of Ripples in Voltage on Particle Charge in ESP

A. IJIMA*

(Received October 13, 1986)

The particle charge is an important parameter predominating the collection performance of the electrostatic precipitators (ESP). The value of charge on spherical particle can be obtained according to Pauthenier's equation with DC high-voltage without ripple, but a DC high-voltage power supply for ESP includes considerable ripples in voltage. The author has theoretically derived the differential equation to obtain the value of charge on a conductive spherical particle with ripples in applied voltage. An experiment is made to verify the calculated results, and a good agreement within the error of experiment is obtained.

1. ま え が き

電気集塵装置における粒子の帯電量は集塵性能に大きな影響を与える重要なパラメータであるが、粒子の帯電については、印加電圧が脈動分を含まない直流として検討されていた。実際に電気集塵装置用に使用されている直流高圧電源の大部分は単相全波整流方式であり、したがって印加電圧波形にはかなりの脈動が含まれている。また、今後多く使用されると見られるプリチャージャ等の荷電時間の短い装置に対する粒子の帯電においては、粒子は時間変化を伴う電界の影響を受ける。したがって、印加電圧に含まれる脈動分の粒子帯電に対する影響を明らかにすることは、今後の重要な研究課題である。

イオン流の存在する平等電界中の誘電体（導体をも含む）球の帯電量に関しては、Pauthenier¹⁾が、ある仮定のもとに帯電量を理論的に求めている。逆に脈動の含まない直流コロナ電界中での鋼球の帯電量を測定して、その電界強度を求めることも Cooperman²⁾ および諫早³⁾により行なわれている。また、高抵抗粒子の帯電量については、増田および鷺津⁴⁾が Pauthenier 理論に含まれる矛盾を修正した厳密な解析結果を与えている。

しかし実用的にはイオン衝突による粒子の帯電量を求めるのに、従来主として印加電圧に脈動を含まない直流コロナ電界を仮定し、Pauthenier の式¹⁾が使用されてき

た。筆者は、印加電圧に脈動分を含んだ場合、粒子の帯電にどのような影響を与えるかについて、理論解析を行ない、かつモデル集塵装置で鋼球落下法を使用してこの理論を検証した。その結果、荷電時間と帯電量について理論値と測定値についてよい一致が得られたので以下に報告する。

2. 脈動コロナ電界中における粒子帯電の理論

一般にイオン衝突による粒子の帯電量を求めるのに、Pauthenier の式¹⁾が使用されている。この理論式は、印加電圧に脈動を含まない直流の場合についてのみ取り扱ったものである。そこで印加電圧に脈動分を含むときの粒子の帯電について以下に検討する。

粒子の帯電について、Pauthenier の式の誘導に用いられた次の三つの仮定が成立するものとする。

- (1) 粒子は球形である。
- (2) 粒子の存在する空間は、粒子径に比べて十分大きい。
- (3) 粒子周辺のイオン密度および電界強度は平等である。

平等電界 E に置かれた半径 a の鋼球周辺の電界分布は、図 1 のようになる。

ここで、球から十分離れた場所の電流密度を J 、電界強度を E 、イオン空間電荷密度を ρ_i とし、球に流入するイオン流束が球から十分離れた場所でする面積を S とすると、粒子に流れ込むイオン電流 i は、

$$i = JS \quad (1)$$

* オリジン電気株式会社 (171 東京都豊島区高田 1-18-1)
Origin Electric Co., Ltd., 18-1, Takada 1-chome,
Toshima-ku, Tokyo, 171 Japan

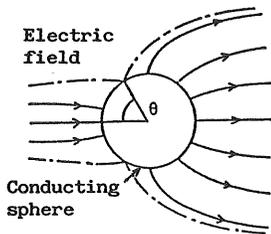


図1 平等電界中に置かれた導体球の電界分布
Fig. 1 Electric field for partially charged conductive sphere in a uniform field.

また、イオンの移動度を μ_1 とすれば、 J は次式となる。

$$J = \rho_1 \mu_1 E \quad (2)$$

球の外側の電位 ϕ^+ は、

$$\phi^+ = -Er \cos \theta + \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} a^3 E \frac{\cos \theta}{r^2} - \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r}$$

球の内側の電位 ϕ^- は、

$$\phi^- = -\frac{3}{\epsilon_s + 2} Er \cos \theta$$

したがって球表面における表面電荷密度 σ は、

$$\begin{aligned} \sigma &= -\epsilon_0 \left(\frac{\partial \phi^+}{\partial r} \right)_{r=a} \\ &= \epsilon_0 E \cos \theta + 2 \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \cos \theta + \frac{q}{4\pi \epsilon_0 a^2} \\ &= \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \cos \theta + \frac{q}{4\pi a^2} \end{aligned}$$

そこで流入イオン流束の境界位置 (図1における θ) は、表面電界強度がゼロとなるところであるから、 $\sigma = 0$ とし次式で与えられる。

$$\cos \theta = -(\epsilon_s + 2) q / 12\pi \epsilon_s \epsilon_0 a^2 E \quad (3)$$

ただし、 $|\cos \theta| \leq 1$ でなければならない ($q \leq q_m$)。この球に入り込む誘電束の総数は、角度 θ で囲まれる球の表面積上の σ の総和として次のように求められる。

$$\begin{aligned} \Phi &= -\int_{\theta}^{\pi} \sigma \cdot 2\pi a^2 \sin \theta d\theta \\ &= -2\pi a^2 \int_{\theta}^{\pi} \left[\frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \cos \theta + \frac{q}{4\pi a^2} \right] \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (4)$$

(3)式を(4)式に代入して積分すれば、次式を与える。

$$\Phi = \pi a^2 \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \left[1 - \frac{\epsilon_s + 2}{4\pi a^2 \cdot 3\epsilon_s \epsilon_0 E} q \right]^2 \quad (5)$$

いま粒子の時間 t における帯電量を q とすると、

$$i = dq/dt \quad (6)$$

また、 $s = \Phi/E$ であるから、これらと(1)式を用いればコロナ電界中における粒子帯電の基礎方程式として次

の微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= JS = \mu_1 \rho_1 E \frac{\Phi}{\epsilon_0 E} \\ &= \mu_1 \rho_1 \pi a^2 \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \left[1 - \frac{\epsilon_s + 2}{4\pi a^2 \cdot 3\epsilon_s \cdot \epsilon_0 E} q \right]^2 \quad (7) \end{aligned}$$

直流コロナ電界中の時間 t における帯電量 q は、 E が一定として(7)式を t について積分することにより求められる。いま、 $t=0$ で $q=0$ なる初期値をいれると、

$$\begin{aligned} q &= \frac{t}{(\epsilon_s + 2)t / 4\pi a^2 \cdot 3\epsilon_s \epsilon_0 E} + \frac{1}{\mu_1 \rho_1 \pi a^2 3\epsilon_s / (\epsilon_s + 2)} \\ &= 4\pi a^2 \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 E \frac{t}{t + 4\epsilon_0 / \mu_1 \rho_1} = q_m \frac{t}{t + \tau} \quad (8) \end{aligned}$$

ただし、

$$q_m = 4\pi a^2 \cdot 3\epsilon_0 E \left(\frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \right) \quad (\text{飽和帯電量})$$

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{\mu_1 \rho_1} = \frac{4\epsilon_0 E}{J} \quad (\text{帯電時定数})$$

J : 電流密度

脈動コロナ電界中では E が時間とともに変動する関数 $E(t)$ となり、電荷量を求めるには式(7)における電界強度 E を時間の関数として、これを積分する必要がある。ただし、右辺 [] 内が負のときはゼロとなる。

解を一般性のある形で得るため、次のように規格化を行なう。以下、添字 n によって規格化された量を表わすことにする。

$$\begin{aligned} q &= q_m q_n \\ E &= E_0 E_n \\ t &= t_p t_n \\ \rho_1 &= \rho_{10} \rho_n \end{aligned} \quad (9)$$

ただし

$$q_m = 4\pi a^2 \cdot 3\epsilon_0 E \left(\frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \right) \quad (\text{Pauthenier の飽和帯電量})$$

E_0 は球から十分はなれた場所における脈動電界の時間的平均値とし、

$$\begin{aligned} E_n &= 1 + \gamma \cos \omega t / 2 \\ t_p &= 4\epsilon_0 / \mu_1 \rho_{10} \end{aligned} \quad (10)$$

ρ_{10} : E_0 のときのイオンの空間電荷密度、 γ : 脈動率、 J_0 : E_0 のときの電流密度

また、 $J_n = f(E_n)$ とすると、

$$\rho_n = \frac{\rho_1}{\rho_{10}} = \frac{J}{\rho_{10} \mu_1 E} = \left(\frac{1}{\mu_1 \rho_{10}} \right) \left(\frac{J_0 J_n}{E_0 E_n} \right) = \frac{J_n}{E_n} = \frac{f(E_n)}{E_n} \quad (11)$$

これらにより、

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= 4\pi a^2 \left(\frac{3\epsilon_0 \epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \right) E_0 \left(\frac{\mu_1 \rho_1}{4E_0} \right) \frac{dq_n}{dt_n} \\ &= \pi a^2 \left(\frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} \right) E_0 \mu_1 \rho_1 \frac{dq_n}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

(7)~(12)式より,

$$dq_n/dt_n = \rho_n [1 - q_n/E_n]^2 \quad (13)$$

ただし, (13)式において q_n, ρ_n, E_n は時間の関数であり, $q_n > E_n$ の範囲ではゼロになる。

印加電圧に脈動分を含んでいる場合, 帯電量の時間変化は(13)式を数値計算により解けばよい。

電気集塵装置のコロナ放電特性は, 実用範囲において近似的に, $J = CV^D$ で表示できるから^{3,6)}, $J_0 = CE_0^D$ となり,

$$J_n = (1/J_0) CE_0^D E_n^D = E_n^D \quad (14)$$

$$\rho_n = J_n/E_n = E_n^D/E_n = E_n^{(D-1)} \quad (15)$$

ただし, D は定数である。

ρ_n は, (15)式のように一つのパラメータで表わせる。

$$\therefore dq_n/dt_n = E_n^{(D-1)} [1 - q_n/E_n]^2 \quad (16)$$

(16)式により負の印加電圧および印加電圧の脈動率をパラメータとして, 直径 3 mm の鋼球帯電量 (飽和帯電量に対する割合) の時間推移を, コンピュータで後述の図 5 に示す円筒型電極のモデル集塵装置 (荷電時間 100 ms) について数値計算したグラフを図 2 の (a)~(e) に示す。同図縦軸の帯電量のカーブは, 下から印加電圧が, 15 kV (平均電界 3 kV/cm), 25 kV (5 kV/cm), 35 kV (7 kV/cm), 45 kV (9 kV/cm) の 4 本であり, 帯電量は Pauthenier の飽和帯電量に対する比率で示し, 横軸の時間は 100 ms (荷電時間) まで表示している。この場合のコロナ放電 $V-I$ 特性は, モデル集塵装置における実測のデータより(17)式に示すものを使用した。

$$J = 5.46199 \{V(1 + \gamma \cos \omega t / 2)\}^{2.87447} \times 10^{-4} \quad (17)$$

ただし, J : 集塵極の電流密度 (mA/m^2), V : 印加電圧 (kV)

同様に正の印加電圧について帯電の様子を計算したグラフを図 3 の (a)~(e) に示す。使用したコロナ放電 $V-I$ 特性を(18)式に示す。

$$J = 1.831 \{V(1 + \gamma \cos \omega t / 2)\}^{3.27514} \times 10^{-4} \quad (18)$$

両図ともモデル集塵装置に鋼球が入ったときに印加電圧の脈動のピーク値であるが, 負の印加電圧について印加電圧の脈動のピーク値およびボトム値のときに鋼球が入ったときの帯電について時間推移の様子を一例として, 脈動率 100% のグラフを図 4 に示す。同図から明らかのように, 印加電圧のピーク値またはボトム値のときに鋼球が, 集塵装置に入っても 50 ms も経過すると帯

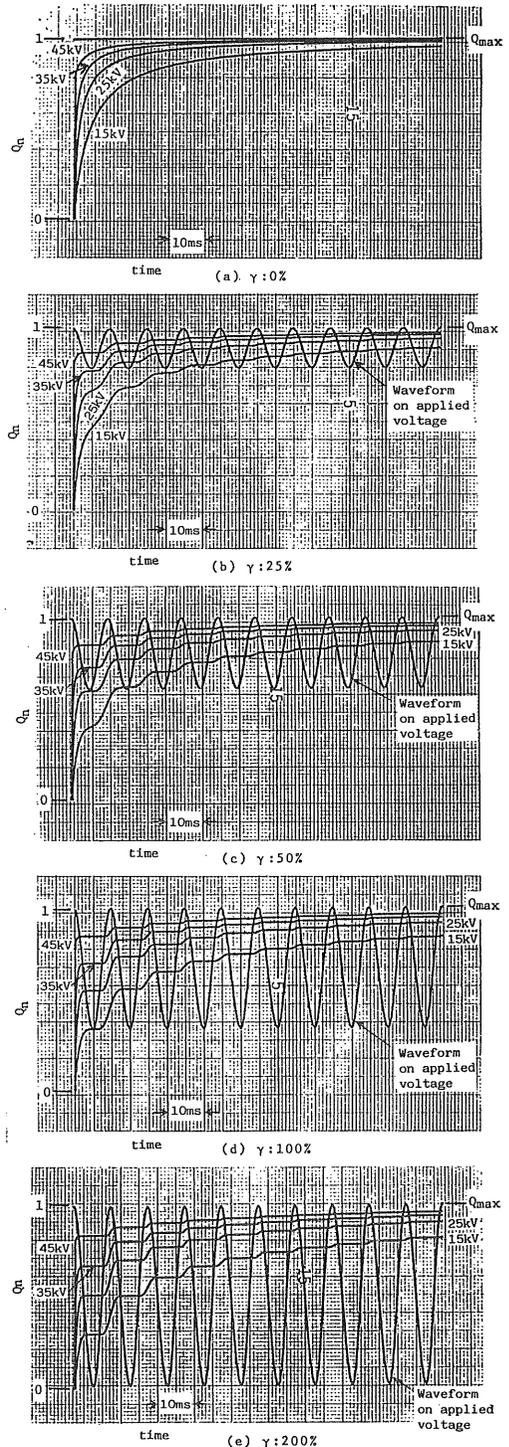


図 2 脈動分を含んだ負の印加電圧による鋼球帯電の時間経過

Fig. 2 Time increase in charge on a conductive sphere under rippled field (negative corona).

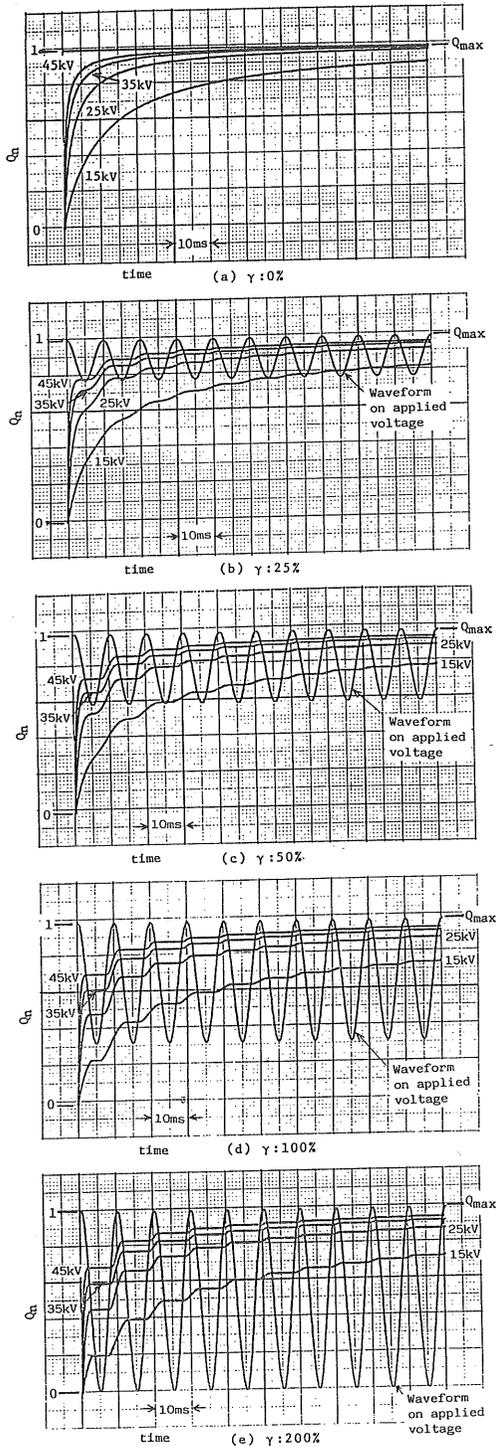


図3 脈動分を含んだ正の印加電圧による鋼球帯電の時間経過

Fig. 3 Time increase in charge on a conductive sphere under rippled field (positive corona).

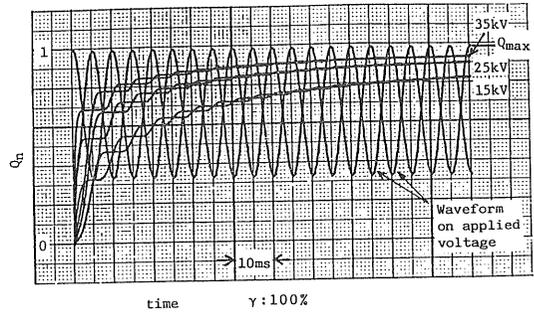


図4 脈動分を含んだ負の印加電圧の位相差による鋼球帯電の時間経過

Fig. 4 Time increase in charge on a conductive sphere under different phase rippled field (negative corona).

電量はほとんど同じ値になる。

印加電圧および脈動率を変化し、鋼球がモデル集塵装置に入った瞬間が印加電圧のピーク値およびボトム値の場合、鋼球が集塵装置を通過する間の帯電量と飽和帯電量に対する比率を数値計算した結果を負の印加電圧を表1に、正の印加電圧を表2に示す。

脈動率に対する荷電時間5秒までの帯電量の計算結果を表3に示す。以上の表で、帯電量 Q_s は(8)式により印加電圧が直流として荷電時間 100 ms で計算したものを示し、 Q_{10} は(16)式により印加電圧に脈動分を含み荷電時間 100 ms で計算したもの、 Q_m は飽和帯電量を示している。

3. 実験装置および方法

図5は実験に用いた直流印加電圧の脈動分を可変できる電源装置とモデル集塵装置の概要である。高電圧電源装置は、先に報告した(その1)図1(a), (b)に示したものと同一であり、同図(a)の回路は、負荷電流の増加に伴って脈動率 γ [(最大値-最小値)/平均値] が増加する特性であり、(b)の回路方式は、負荷電流を変化しても脈動率を簡単な操作で一定に保つことができる^{5,7)}。脈動分は電気集塵装置に使用されている単相全波整流と同様に 100 Hz の基本周波数に設定している。電源装置は交流を単相全波整流した後、フィルタ回路を通して脈動率 1% 以下の直流に変換し、マスタインバータで 100 Hz の交流を発生させ、変圧器 T_2 により昇圧の後、脈動率 3% 以下で約 50 kV の直流に変換する。直流に脈動分を含ませるため、マスタインバータに同期させたスレーブインバータで 100 Hz の交流を発生させ、変圧器 T_2 で約 30 kV に昇圧し、直流阻止用コンデンサ C_2 を通して交流分を重畳している。図6に図1(b)の電源装置における負極出力電圧波形を示す。

表 1 モデル集塵装置による負の印加電圧各種脈動率での鋼球帯電量の計算結果

Table 1 Computed charge on a conductive sphere under several ripples in applied negative voltage for model ESP.

| Voltage (kV) | Ripple (%) | Phase (deg) | Charge (Q_{16}) (C) | Q_{16}/Q_8 | Charge (Q_8) (C) | Q_{16}/Q_m |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| 15.0 | 0.0 | 0 | 2.1517E-10 | 1.001 | 2.1501E-10 | 0.954 |
| 15.0 | 25.0 | 0 | 1.9970E-10 | 0.929 | 2.1501E-10 | 0.886 |
| 15.0 | 25.0 | 180 | 1.9987E-10 | 0.930 | 2.1501E-10 | 0.886 |
| 15.0 | 50.0 | 0 | 1.9303E-10 | 0.901 | 2.1501E-10 | 0.860 |
| 15.0 | 50.0 | 180 | 1.9409E-10 | 0.903 | 2.1501E-10 | 0.861 |
| 15.0 | 100.0 | 0 | 1.8788E-10 | 0.874 | 2.1501E-10 | 0.833 |
| 15.0 | 100.0 | 180 | 1.8825E-10 | 0.876 | 2.1501E-10 | 0.835 |
| 15.0 | 200.0 | 0 | 1.8264E-10 | 0.849 | 2.1501E-10 | 0.810 |
| 15.0 | 200.0 | 180 | 1.8300E-10 | 0.851 | 2.1501E-10 | 0.812 |
| 25.0 | 0.0 | 0 | 3.6902E-10 | 1.000 | 3.6888E-10 | 0.982 |
| 25.0 | 25.0 | 0 | 3.5220E-10 | 0.955 | 3.6888E-10 | 0.937 |
| 25.0 | 25.0 | 180 | 3.5247E-10 | 0.956 | 3.6888E-10 | 0.938 |
| 25.0 | 50.0 | 0 | 3.4690E-10 | 0.940 | 3.6888E-10 | 0.923 |
| 25.0 | 50.0 | 180 | 3.4738E-10 | 0.942 | 3.6888E-10 | 0.924 |
| 25.0 | 100.0 | 0 | 3.4159E-10 | 0.926 | 3.6888E-10 | 0.909 |
| 25.0 | 100.0 | 180 | 3.4215E-10 | 0.928 | 3.6888E-10 | 0.911 |
| 25.0 | 200.0 | 0 | 3.3670E-10 | 0.913 | 3.6888E-10 | 0.896 |
| 25.0 | 200.0 | 180 | 3.3727E-10 | 0.914 | 3.6888E-10 | 0.898 |
| 35.0 | 0.0 | 0 | 5.2103E-10 | 1.000 | 5.2090E-10 | 0.990 |
| 35.0 | 25.0 | 0 | 5.0413E-10 | 0.968 | 5.2090E-10 | 0.958 |
| 35.0 | 25.0 | 180 | 5.0451E-10 | 0.969 | 5.2090E-10 | 0.959 |
| 35.0 | 50.0 | 0 | 4.9936E-10 | 0.959 | 5.2090E-10 | 0.949 |
| 35.0 | 50.0 | 180 | 4.9987E-10 | 0.960 | 5.2090E-10 | 0.950 |
| 35.0 | 100.0 | 0 | 4.9446E-10 | 0.949 | 5.2090E-10 | 0.940 |
| 35.0 | 100.0 | 180 | 4.9503E-10 | 0.950 | 5.2090E-10 | 0.941 |
| 35.0 | 200.0 | 0 | 4.9023E-10 | 0.941 | 5.2090E-10 | 0.932 |
| 35.0 | 200.0 | 180 | 4.9083E-10 | 0.942 | 5.2090E-10 | 0.933 |

集塵装置のモデルは、円筒型電極と平板型電極の2種類を使用した。円筒型電極の大きさは、直径 10 cm、長さ 30 cm であり、円筒電極の中心に放電極として直径 0.05 cm の鋼線を配置し、中心にイオン電流密度を測定するために上下のガード電極と絶縁した主電極（プローブ電極）を備えている。

平板型電極の大きさは、幅 16 cm、長さ 30 cm の平板電極であり、平板の間隔を 10 cm とし、その中心軸上に直径 0.05 cm の放電線を配置したものである。なお、片側の平板電極の中心部にイオン電流密度測定用プローブ電極を備えている。コロナ放電空間における粒子の帯電を測定する方法として、モデル集塵装置の上部に接地された金属板を設け、金属板の位置決めされている穴から、ボールベアリング用の直径 3 mm ± 5 μm の鋼球を落下させ、下部に備えたファラデーケージに受け、

振動容量型電位計と X-Y レコーダにより鋼球の帯電量を求めた。

円筒型電極および平板型電極のモデル集塵装置では、鋼球を落下する位置から集塵装置の入口までの距離 $h_1 = 32.5$ cm、集塵装置の出口までの距離 $h_2 = 62.5$ cm であり、鋼球が集塵装置内を通過する時間 t は、次式から求められる

$$t = \sqrt{2/g} (\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}) = \sqrt{2/980} (\sqrt{62.5} - \sqrt{32.5}) \approx 0.1 \text{ s}$$

4. 実験結果および考察

4.1 実験結果

図 5 (a) の電源回路により印加電圧の脈動分を変化した場合、円筒型電極を使用し、放電線より 3 cm 離れた位置で鋼球を落下したときの負極および正極コロナ放電

表 2 モデル集塵装置による正の印加電圧各種脈動率での鋼球帯電量の計算結果

Table 2 Computed charge on a conductive sphere under several ripples in applied positive voltage for model ESP.

| Voltage (kV) | Ripple (%) | Phase (deg) | Charge (Q_{10}) (C) | Q_{10}/Q_0 | Charge (Q_0) (C) | Q_{10}/Q_m |
|--------------|------------|-------------|-------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| 15.0 | 0.0 | 0 | 2.0863E-10 | 1.001 | 2.0842E-10 | 0.925 |
| 15.0 | 25.0 | 0 | 1.8986E-10 | 0.911 | 2.0842E-10 | 0.842 |
| 15.0 | 25.0 | 180 | 1.9002E-10 | 0.912 | 2.0842E-10 | 0.843 |
| 15.0 | 50.0 | 0 | 1.8165E-10 | 0.872 | 2.0842E-10 | 0.806 |
| 15.0 | 50.0 | 180 | 1.8189E-10 | 0.873 | 2.0842E-10 | 0.807 |
| 15.0 | 100.0 | 0 | 1.7338E-10 | 0.832 | 2.0842E-10 | 0.769 |
| 15.0 | 100.0 | 180 | 1.7368E-10 | 0.833 | 2.0842E-10 | 0.770 |
| 15.0 | 200.0 | 0 | 1.6626E-10 | 0.798 | 2.0842E-10 | 0.737 |
| 15.0 | 200.0 | 180 | 1.6656E-10 | 0.799 | 2.0842E-10 | 0.739 |
| 25.0 | 0.0 | 0 | 3.6657E-10 | 1.000 | 3.6640E-10 | 0.976 |
| 25.0 | 25.0 | 0 | 3.4677E-10 | 0.946 | 3.6640E-10 | 0.923 |
| 25.0 | 25.0 | 180 | 3.4703E-10 | 0.947 | 3.6640E-10 | 0.924 |
| 25.0 | 50.0 | 0 | 3.4018E-10 | 0.928 | 3.6640E-10 | 0.905 |
| 25.0 | 50.0 | 180 | 3.4061E-10 | 0.930 | 3.6640E-10 | 0.906 |
| 25.0 | 100.0 | 0 | 3.3351E-10 | 0.910 | 3.6640E-10 | 0.888 |
| 25.0 | 100.0 | 180 | 3.3405E-10 | 0.912 | 3.6640E-10 | 0.889 |
| 25.0 | 200.0 | 0 | 3.2751E-10 | 0.894 | 3.6640E-10 | 0.872 |
| 25.0 | 200.0 | 180 | 3.2807E-10 | 0.895 | 3.6640E-10 | 0.873 |
| 35.0 | 0.0 | 0 | 5.2003E-10 | 1.000 | 5.1989E-10 | 0.989 |
| 35.0 | 25.0 | 0 | 5.0128E-10 | 0.964 | 5.1989E-10 | 0.953 |
| 35.0 | 25.0 | 180 | 5.0165E-10 | 0.965 | 5.1989E-10 | 0.954 |
| 35.0 | 50.0 | 0 | 4.9584E-10 | 0.954 | 5.1989E-10 | 0.943 |
| 35.0 | 50.0 | 180 | 4.9637E-10 | 0.955 | 5.1989E-10 | 0.944 |
| 35.0 | 100.0 | 0 | 4.9020E-10 | 0.943 | 5.1989E-10 | 0.932 |
| 35.0 | 100.0 | 180 | 4.9080E-10 | 0.944 | 5.1989E-10 | 0.933 |
| 35.0 | 200.0 | 0 | 4.8525E-10 | 0.933 | 5.1989E-10 | 0.922 |
| 35.0 | 200.0 | 180 | 4.8590E-10 | 0.935 | 5.1989E-10 | 0.924 |

による帯電量と印加電圧のピーク値の関係を図7に示す。図7から明らかなように、鋼球の帯電量は、印加電圧のピーク値に比例して増加することがわかる。なお、コロナ開始電圧付近になると帯電量は、著しく低下している。

負極コロナ放電について、印加電圧の(ピーク値)/(平均値)の値と帯電量の関係を図8に示す。同図から明らかなように、鋼球の帯電量は、印加電圧の(ピーク値)/(平均値)に比例して増大している^{7,8)}。

図5(b)に示したような、負荷電流を変化しても脈動率を一定にできる電源回路で円筒型電極を使用し、印加電圧が負極および正極での脈動率3%以下の直流と脈動率200%の直流を印加した場合、放電線より3cm($r=3$ cm)離れた位置で鋼球を落下したときの帯電量と印加電圧のピーク値の関係を図9に示す。脈動率が200%の

直流電圧を印加した場合の鋼球帯電量は、脈動率3%以下の直流印加電圧より極性に関係なく7~24%低い値である。また、同一の脈動率の印加電圧では、正極を印加した場合の鋼球帯電量は、負極の場合より約9%低い値である。この場合のコロナ放電 $V-I$ 特性として、印加電圧ピーク値と集塵極電流密度の関係を図10に示す⁷⁾。

平板型電極を使用し、負荷電流を変化しても脈動率を一定にできる電源回路(図5(b))を使用し、放電線から平板に向かって3cm離れた位置で鋼球を落下した場合、鋼球の帯電量と印加電圧ピーク値の関係を図11に負極コロナ放電、図12に正極コロナ放電のデータを示す。同じ電源回路で印加電圧のピーク値を同一値とし、負極および正極での脈動率3%以下の直流と脈動率200%の直流を印加した場合、放電線より3cm離れた位置で鋼球を落下したときの帯電量と印加電圧のピーク値

表 3 負の印加電圧各種脈率率での荷電時間 5 秒までの鋼球帯電量 (Q_{10}/Q_m) の計算結果

Table 3 Time increase in (Q_{10}/Q_m) on a conductive sphere under several ripples in applied negative voltage.

| Voltage (kV) | Ripple (%) | Time (s) | | | | | |
|--------------|------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 15.0 | 0.0 | 0.990 | 0.995 | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.999 |
| 15.0 | 25.0 | 0.959 | 0.973 | 0.983 | 0.987 | 0.990 | 0.992 |
| 15.0 | 50.0 | 0.949 | 0.967 | 0.980 | 0.986 | 0.989 | 0.991 |
| 15.0 | 100.0 | 0.939 | 0.963 | 0.979 | 0.985 | 0.989 | 0.991 |
| 25.0 | 0.0 | 0.996 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 1.000 | 1.000 |
| 25.0 | 25.0 | 0.978 | 0.986 | 0.992 | 0.994 | 0.996 | 0.997 |
| 25.0 | 50.0 | 0.972 | 0.984 | 0.992 | 0.994 | 0.996 | 0.996 |
| 25.0 | 100.0 | 0.971 | 0.984 | 0.991 | 0.994 | 0.996 | 0.996 |
| 35.0 | 0.0 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 35.0 | 25.0 | 0.983 | 0.989 | 0.993 | 0.995 | 0.996 | 0.996 |
| 35.0 | 50.0 | 0.980 | 0.987 | 0.992 | 0.994 | 0.995 | 0.996 |
| 35.0 | 100.0 | 0.976 | 0.985 | 0.990 | 0.993 | 0.994 | 0.995 |

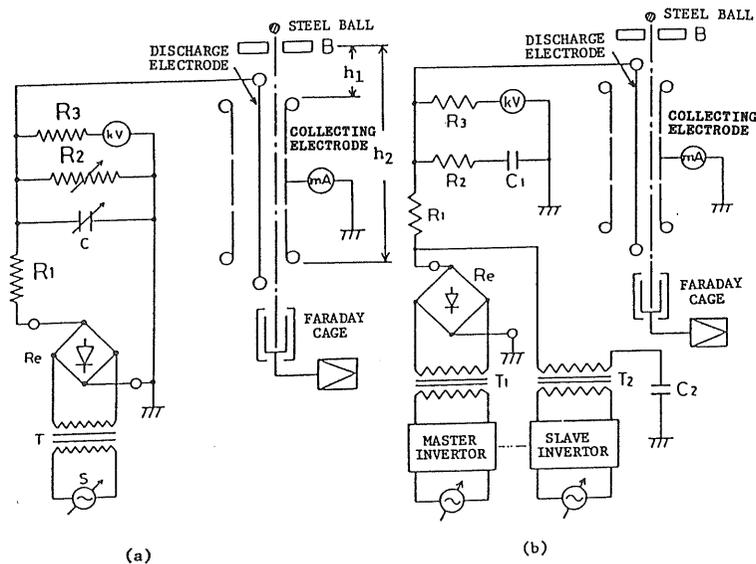


図 5 電源装置とモデル集塵装置の概要

Fig. 5 Schematic diagram for experimental apparatus.

の関係を図 13 に示す。円筒電極型と同様に、鋼球の帯電量は、印加電圧のピーク値に比例し、脈率率が 200% の直流を印加した場合の鋼球帯電量は、脈率率 3% 以下の直流より印加電圧の極性に関係なく約 6~23% 低い値である。また、同じ脈率率の印加電圧では、正極を印加した場合の鋼球帯電量は、負極の場合より約 10% 低い値である。

4.2 考 察

実験装置のモデル集塵装置を鋼球が通過する時間は、

約 100 ms であり、脈動のない直流電圧で Pauthenier の式における時定数 τ は、 -15 kV で約 4.8 ms、 -30 kV で約 1.3 ms になり、帯電量は飽和帯電量の 95.2% および 98.6% となる。同様に $+15$ kV および $+30$ kV の時定数は、それぞれ約 8.1 ms、約 1.6 ms となり、帯電量は、飽和帯電量の 92.1、98.3% となる。

モデル集塵装置における鋼球の帯電量を負の印加電圧の脈動を含めて数値計算した表 1 から明らかのように、印加電圧が -15 kV で脈率率 γ が 100% と 0% の帯電

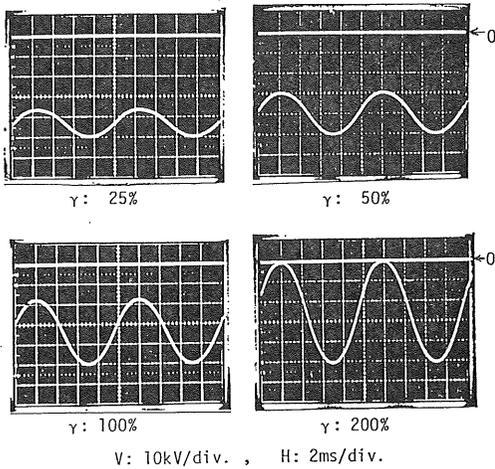


図 6 図 5(b)の回路方式の印加電圧波形
Fig. 6 Voltage waveform obtained by circuit (b) in Fig. 5 (b).

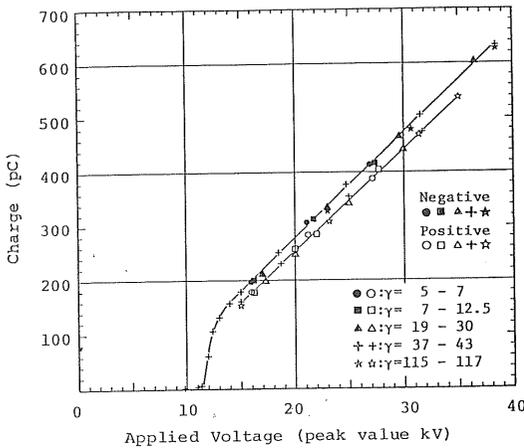


図 7 印加電圧ピーク値と鋼球の帯電量 (円筒型電極)
Fig. 7 Charge on a conductive sphere vs. applied peak voltage.

量の比は約 13%, $r:100\%$ と 25% の比は約 6% であり, -35 kV になると $r:100\%$ と 0% の比が約 5%, $r:100\%$ と 25% の比は約 2% とわずかになる. また, 正の印加電圧では, 表 2 から $+15\text{ kV}$ で $r:100\%$ と 0% の帯電量の比は約 17%, $r:100\%$ と 25% の比は約 9%, $+35\text{ kV}$ で $r:100\%$ と 0% の比は約 6%, $r:100\%$ と 25% の比は約 2% である. したがって, 図 7 に示されるように鋼球の帯電量は, この脈動率の範囲では印加電圧のピーク値に比例して増加することが理論的にも一致している.

図 9 に示したような, 印加電圧に脈動を含まない直流と脈動率 200% の直流での帯電量について検討してみ

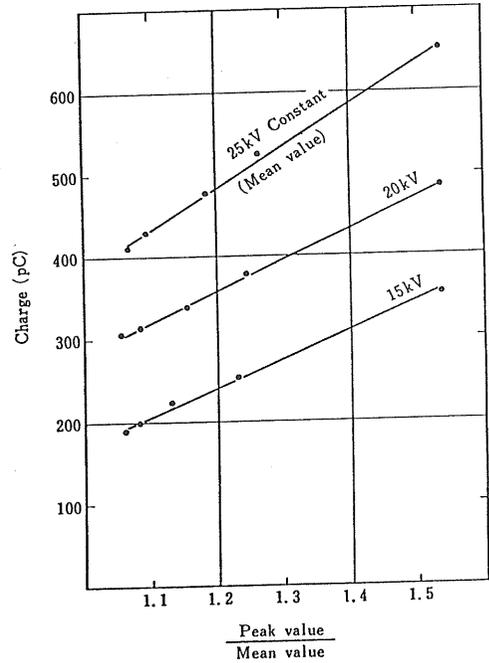


図 8 印加電圧の (ピーク値/平均値) と鋼球の帯電量 (円筒型電極)
Fig. 8 Charge on a conductive sphere vs. peak/mean in applied voltage.

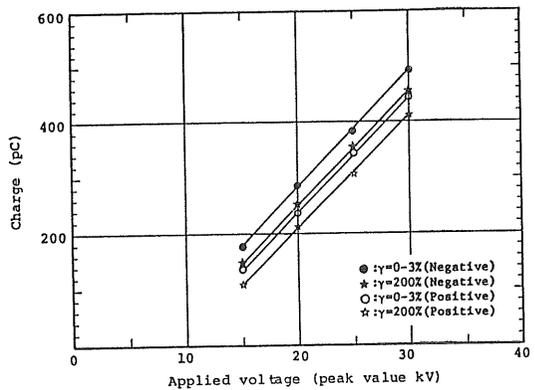


図 9 印加電圧のピーク値と鋼球の帯電量 (円筒型電極)
Fig. 9 Charge on a conductive sphere vs. applied peak voltage.

る.

印加電圧の脈動を含めた鋼球の帯電量を数値計算した表 1, 2 から, $r=0\%$ と $r=200\%$ の帯電量の比と図 9 の実測値での比を取り, 理論値と実測値の関係を図 14 に示す. 同図から明らかのように理論値と実測値がよく一致していることがわかる.

また, 平板型電極についても円筒型電極と同様なデー

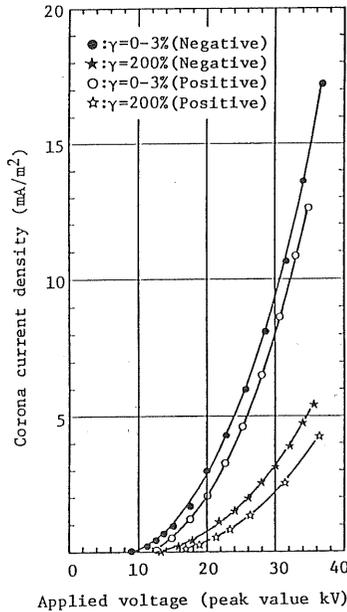


図 10 コロナ放電の電圧・電流特性

Fig. 10 Effect of ripple voltage on corona V-I characteristics.

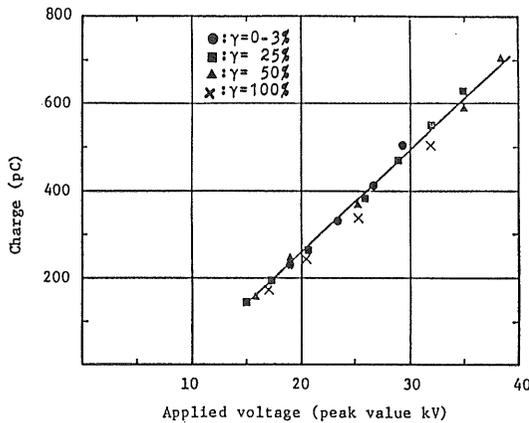


図 11 負の印加電圧のピーク値と鋼球の帯電量 (平板型電極)

Fig. 11 Charge on a conductive sphere vs. applied negative peak voltage (duct-type electrode).

タが得られており、鋼球の帯電量は印加電圧のピーク値に比例している。印加電圧の脈動分を含めた理論値と実測値の $\gamma=0\%$ と $\gamma=200\%$ の帯電量の比も図 11 および 12 から明らかなように、円筒型電極とほぼ同様な値になる。

実際の電気集塵装置では、一室を含塵ガスが通過する時間は一般に 5 秒前後が多く、粒子への荷電時間が十分

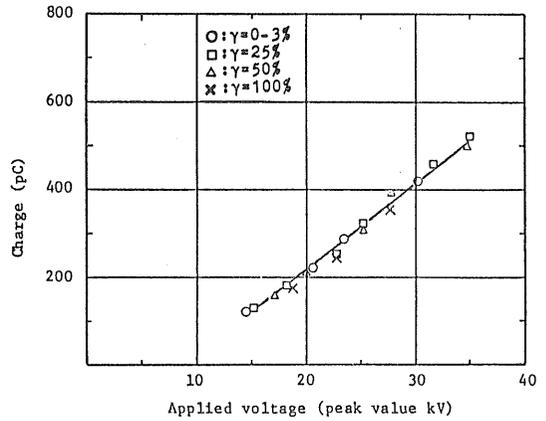


図 12 正の印加電圧のピーク値と鋼球の帯電量 (平板型電極)

Fig. 12 Charge on a conductive sphere vs. applied positive peak voltage (duct-type electrode).

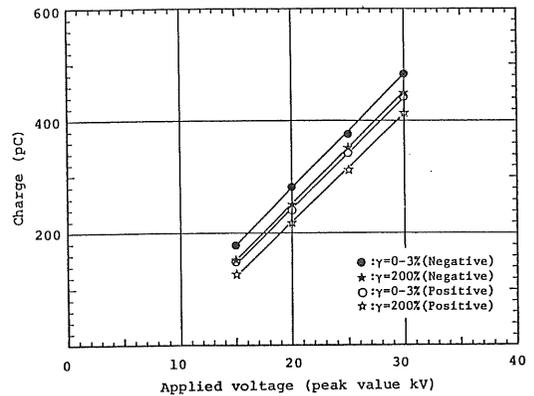


図 13 印加電圧のピーク値と鋼球の帯電量 (平板型電極)

Fig. 13 Charge on a conductive sphere vs. applied peak voltage (duct-type electrode).

あるため、表 3 から判断する限り、少なくとも理論的には印加電圧の脈動分は粒子帯電に影響を及ぼすことはなく、粒子の帯電量は印加電圧のピーク値に比例して増加するものと考えてよいという結論になる。また、プリチャージャ等の荷電時間が 0.5~1 秒程度の短時間のものに対しても、上と同じ結論となる。

5. 結 言

電気集塵装置において、直流の印加電圧に脈動分を含んでいる場合の集塵空間でのイオン衝突による粒子の帯電について、脈動率により粒子の帯電が、時間の経過とともに、どのように変化していくかを理論的に解明し、その妥当性を実験的に検証した。

その結果、実際の電気集塵装置では、ダストへの荷電

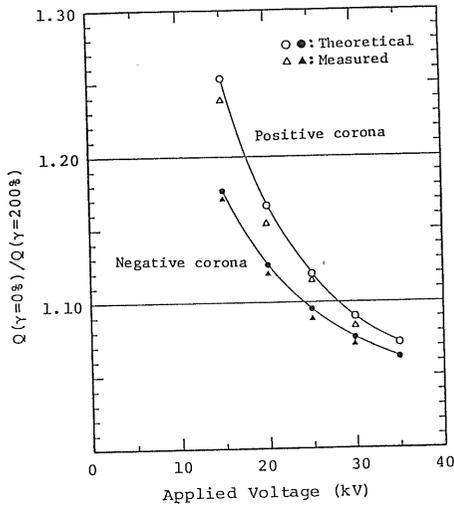


図 14 印加電圧と脈動率 200% と 0% の鋼球帯電量の比
 Fig. 14 Ratio of charge ($\gamma=0\%/\gamma=200\%$) vs. applied voltage.

時間が十分あるため、印加電圧の脈動分の影響を無視することができ、ダストの帯電量の実験値は印加電圧のピーク値に対応する電界値を用いて Pauthenier の式で求めた結果と近似的に一致することが明らかとなった。

本研究を進めるに当たり、終始ご指導をいただいた東京大学教授増田閃一博士および貴重なご意見とご協力をいただいた同研究室鷺津正夫博士に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) M. Pauthenier and M. Hanot : J. Phys. Radium, 3 (1932) 590
- 2) P. Cooperman : AIEE Trans., 75 (1956) 64
- 3) 諫早典夫 : 東京大学学位論文, pp. 13, 34 (1961)
- 4) 増田閃一, 鷺津正夫 : 静電気学会誌, 3 (1979) 153
- 5) 飯島 歩, 増田閃一 : 静電気学会講演論文集, No. 27, a-B6, p. 82 (1978)
- 6) 飯島 歩, 増田閃一 : 静電気学会誌, 11 (1987) 114
- 7) 飯島 歩, 増田閃一 : 電気学会全国大会予稿, No. 1029, p. 1343 (1977)
- 8) A. Iijima : Second International Conference on Electrostatic Precipitation, p. 771 (1984)