

## 論 文

## 電気集塵性能に及ぼす電源の影響（その3）

## 粒子帶電に及ぼす平均コロナ電流の影響

飯 島 歩\*

(1987年4月27日受理)

## Effects of Corona Mean Value Current on Particle Charge in ESP

A. IIJIMA\*

(Received April 27, 1987)

Single-phase full wave rectifiers are most commonly used for the energization of electrostatic precipitators (ESP's). The estimation of particle charge in such ESP has hitherto been made only by the r.m.s. value of the supply current, regardless of the magnitude of the ripples contained in the applied voltage. An extensive research on the effect of the ripples upon particle charge is experimentally made using a model ESP in this work. The results show that the particle charge  $Q$  is given by  $Q = AB\sqrt{I}$  where  $I$ : corona current density,  $A$ : the ratio of the value to be average value of applied voltage, and  $B$ : a constant. In addition, a numerical calculation method is established for the operation corona-current density resulting in a desired value of the particle migration velocity under different voltage conditions containing ripples.

## 1. まえがき

電気集塵装置の運転において、集塵室のコロナ放電状況の良否は、一般に直流高圧電源の出力電圧（平均値）と電流（平均値）のメータ指示値により推定されている。

実際に使用されている電源の大部分は単相全波整流方式であり、印加電圧波形は大きな脈動分が含まれておらず、その脈動分の大きさは電源装置のインピーダンス、集塵装置の構造、排ガスの性状等により変化し、広い範囲に分布している。

含塵粒子の帶電量は、印加電圧の脈動分が大きく異なっても、脈動分に関係なくコロナ電流値の平方根に比例するものと考えられていた。実際問題として、印加電圧波形の違いを考慮した粒子帶電量を同一にするコロナ放電電流値の推定方法がないため、単相電源から三相電源に置き換えるときに、電源の出力電流値を単相電源の出力電流値に比較してどのくらいの値にすればよいか選定に苦労していた。

筆者は、印加電圧に脈動分を含んだ場合、コロナ電流の平均値が粒子の帶電にどのような影響を与えるかにつ

いて、モデル集塵装置で綱球落下法を使用し、脈動分の大きさによる補正方法、および粒子の移動速度と同じにするコロナ電流値を数値計算により求める方法を明らかにしたので以下に報告する。

## 2. 実験装置および方法

図1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部とモデル集塵装置の概要である。実際の電気集塵装置用電源には、単相全波整流電源が多く使用されており、その電源の出力波形は商用周波数の2倍の周波数(100 Hz または 120 Hz)の脈動を含んだものである。実験用電源も実際の集塵装置用電源と同じような 100 Hz の周波数の脈動電圧を含むようにした。本研究で用いた電源装置は、図1に示したような負荷電流を変化しても脈動率  $r$  [(最大値 - 最小値)/平均値] を簡単な操作で一定に保つため、直流電圧に 100 Hz の交流電圧を重畠したるものである。同回路の動作の概要は次のとおりである。商用周波の交流電圧を単相全波整流し、フィルタ回路を通して脈動率 1%以下の直流電圧に変換した後、マスターインバータによって 100 Hz の交流に変換して変圧器  $T_1$  により昇圧し、整流して脈動率 3%以下の約 50 kV の直流電圧を発生させた。マスターインバータに同期させたスレーブインバータで 100 Hz の交流を発生し、変圧器  $T_2$  により約 30 kV に昇圧し、直流阻止用コン

\* 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

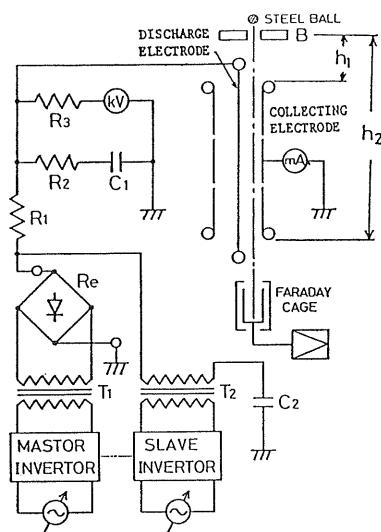


図1 電源装置とモデル集塵装置の概要

Fig. 1 Schematic diagram for experimental apparatus.

デンサ  $C_2$  を通して直流電源に交流を重畠して脈動分を含んだ直流高圧電源を得るようにした。印加電圧の脈動分を可変するために、交流入力側にスライドトランジスタを挿入している。また、直流出力電圧の極性も変えられるようにしている<sup>1)</sup>。実験に使用した電源装置における負極出力電圧波形は、前報の「電気集塵性能に及ぼす電源の影響(その2)」<sup>2)</sup>に示したものと同一である。

使用したモデル集塵装置は、円筒型電極と平板型電極の2種類である。円筒型の場合、集塵電極の大きさは、直径10cm、長さ30cmの円筒であり、円筒電極の中心に放電極として直径0.05cmの鋼線を配置した。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)を設けた。

平板型の場合、平板電極の大きさは、幅16cm、長さ30cmであり、平板電極間の間隔を10cmとした。また、その中心に直径0.05cmの放電線を配置した。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設けた。コロナ放電空間における粒子の帶電の測定は、モデル集塵装置の上部に接地された金属板を設け、金属板に位置決めされている穴からポールベアリング用の直径0.3cm±5μm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て帶電量を求める鋼球落下法により行なった。円筒型電極および平板型電極のモデル集塵装置では、鋼球が落下する位置から集塵装置の入口までの距離 $h_1$ は32.5cm、集塵装置の出口までの距離 $h_2$ は62.5cm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<sup>2)</sup>。

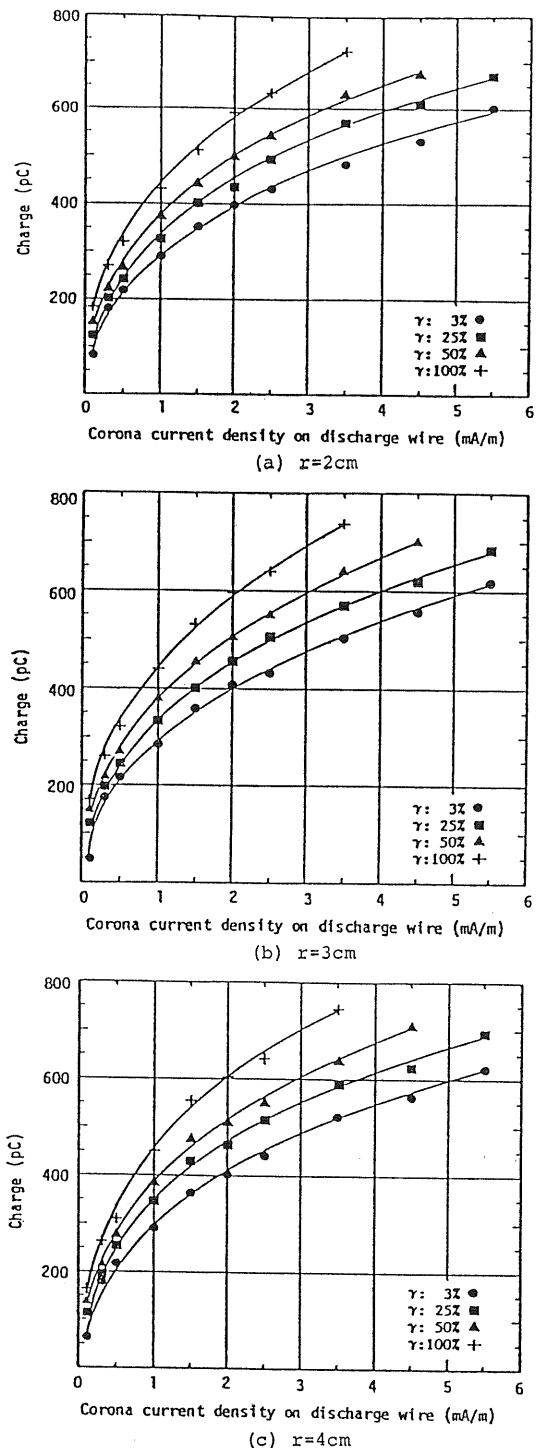


図2 円筒電極の負コロナ放電电流密度と鋼球の帶電量

Fig. 2 Charge on a conducting sphere vs. negative corona current density on pipe-type electrode.

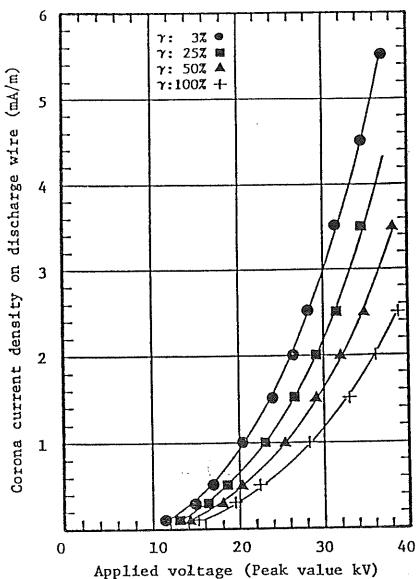
図3 円筒電極の負コロナ放電  $V$ - $I$  特性

Fig. 3 Effect of ripple voltage on negative corona  $V$ - $I$  characteristics on pipe-type electrode.

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

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験結果

円筒電極型モデル集塵装置を使用し、負極コロナ放電において印加電圧の脈動率を変化した場合、放電線から集塵極に向かって、それぞれ 2, 3, 4 cm ( $r=2, 3, 4 \text{ cm}$ ) 離れた位置から鋼球を落下したときの帶電量と放電線のコロナ電流密度の関係を図 2 に示す。同図(a), (b), (c) から明らかなように、放電線から 2, 3, 4 cm 離れた位置での鋼球の帶電量の変化は、5% 以下でありほぼ同一の値である。このときの印加電圧ピーク値と放電線のコロナ放電電流密度の  $V$ - $I$  特性を図 3 に示す。正極コロナ放電においても負極コロナ放電と同様にして、放電線からそれぞれ 2, 3, 4 cm 離れた位置で鋼球を落下したときの帶電量と放電線の電流密度の関係を図 4 に、印加電圧ピーク値と放電線の電流密度の  $V$ - $I$  特性を図 5 に示す。正極コロナ放電においても放電線から 2, 3, 4 cm 離れた位置での鋼球の帶電量は、ほぼ同じ値である。

平板電極型モデル集塵装置を使用し、放電線から集塵板に向かって 3 cm 離れた位置から鋼球を落下したときの帶電量と集塵板のコロナ電流密度の関係について、負極コロナの場合を図 6、正極コロナの場合を図 7 に示す。

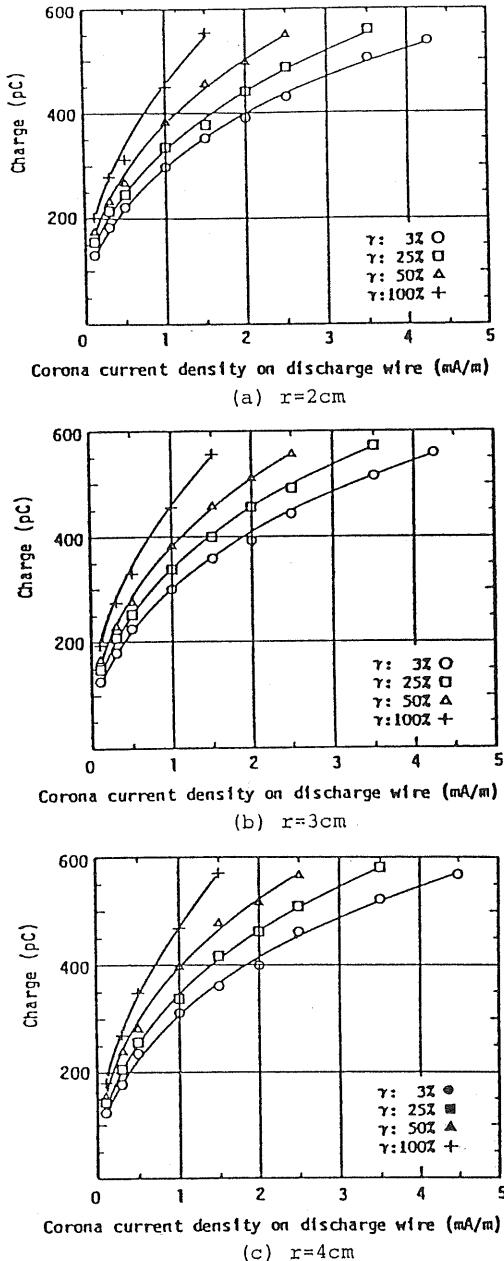


図4 円筒電極の正コロナ放電電流密度と鋼球の帶電量

Fig. 4 Charge on a conducting sphere vs. positive corona current density on pipe-type electrode.

す。このときの印加電圧ピーク値と集塵板の負および正のコロナ電流密度の  $V$ - $I$  特性をそれぞれ図 8, 9 に示す。印加電圧の脈動率を変化させたときの鋼球の帶電量とコロナ電流密度の関係は、図 6 から明らかのように円筒型モデル集塵装置と同じ傾向を示す。

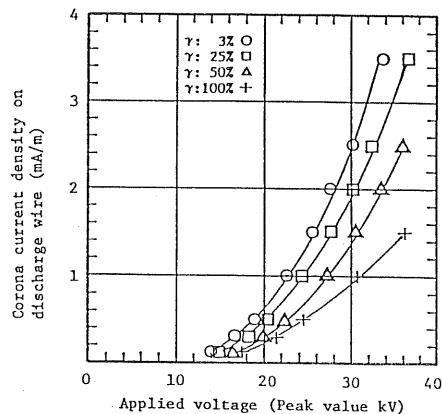
図5 円筒電極の正コロナ放電  $V$ - $I$  特性

Fig. 5 Effect of ripple voltage on positive corona  $V$ - $I$  characteristics on pipe-type electrode.

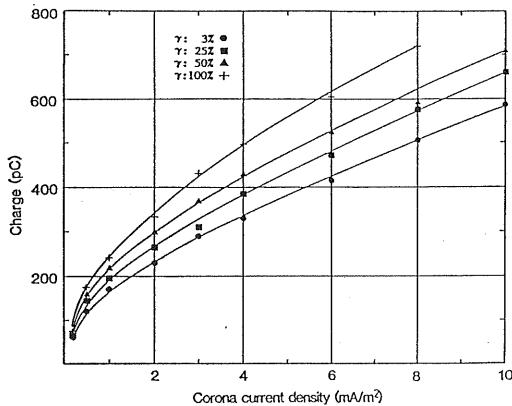


図6 平板電極の負コロナ放電電流密度と鋼球の帶電量

Fig. 6 Charge on a conducting sphere vs. negative corona current density on duct-type electrode.

### 3.2 考 察

円筒型電気集塵装置において、単極性イオン電流のみが存在する場合の電界強度はポアソンの式の解として次式が得られている<sup>3,4)</sup>.

$$E_{rr} = \sqrt{I/2 \pi \epsilon_0 \mu_1 + (E_0 r_0/r)^2} \quad (\text{kV/m}) \quad (1)$$

$I$  : 放電線 1 m 当りのコロナ電流 (A/m)

$\epsilon_0$  : 誘電率

$E_0$  : 放電線のコロナ開始電界強度

$\mu_1$  : イオンの移動度

$r_0$  : 放電線の半径

$r$  : 中心よりの半径

この場合の電界分布は、イオンによる空間電荷の影響で、 $r$  の十分大きな領域、つまり集塵極の近傍の電界がラプラス電界よりも上昇する。この傾向はコロナ電流の

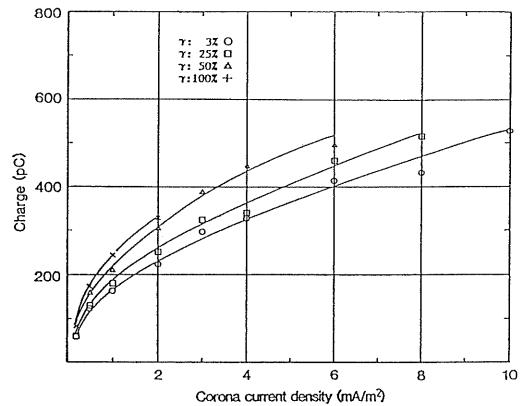


図7 平板電極の正コロナ放電電流密度と鋼球の帶電量

Fig. 7 Charge on a conducting sphere vs. positive corona current density on duct-type electrode.

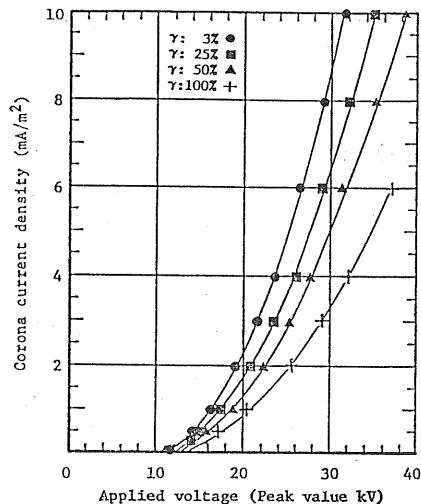
図8 平板電極の負コロナ放電  $V$ - $I$  特性

Fig. 8 Effect of ripple voltage on negative corona  $V$ - $I$  characteristics on duct-type electrode.

上昇とともに顕著となり、集塵極近傍では  $r$  に関係なく次式のように電界は平坦な分布となる<sup>5)</sup>.

$$E = \sqrt{I/2 \pi \epsilon_0 \mu_1} \quad (\text{kV/m}) \quad (2)$$

図1に示した円筒型モデル集塵装置で図3に示す負コロナ放電の  $V$ - $I$  特性を(1)式について数値計算した電界の様子を図10に示す。ただし、大気中のマイナスイオンの移動度を  $2.11(\text{cm/s})/(\text{V/cm})$ 、コロナ開始電界強度を  $53 \text{ kV/cm}$  (実験により得られたコロナ開始電圧  $7 \text{ kV}$  から同心円筒での電界強度を求める式で算出した放電線表面の電界強度<sup>3)</sup>)として計算した。同図から明らかのように、放電線の中心から  $2 \text{ cm}$  以上離れた距離で放電線コロナ電流密度  $1 \text{ mA/m}$  以上になれば、電界

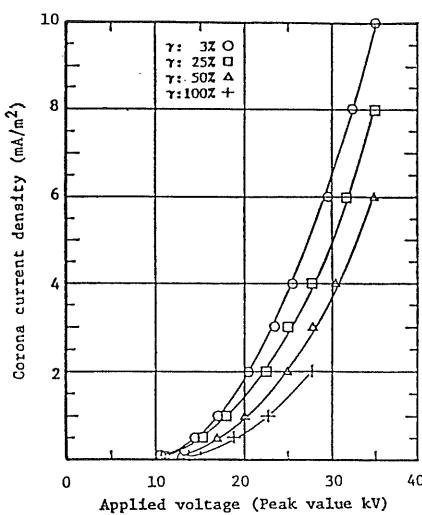
図9 平板電極の正コロナ放電  $V$ - $I$  特性

Fig. 9 Effect of ripple voltage on positive corona  $V$ - $I$  characteristics on duct-type electrode.

は平坦な分布となっている。

図2(a)～(c)に示した特性で、放電線のコロナ放電電流密度が  $0.5 \text{ mA}/\text{m}$  以下の低い範囲では、放電線より  $2 \text{ cm}$  離れた位置の帶電量は、 $3, 4 \text{ cm}$  の値に比較して印加電圧の脈動率に関係なく約  $5\%$  大きな値を示している。また同図で、放電線のコロナ放電電流密度が  $0.5 \text{ mA}/\text{m}$  を越えると、印加電圧の脈動率が同じであれば、放電線からの距離に関係なく帶電量が  $\pm 4\%$  以下の範囲になりほぼ同じ値になる。鋼球の帶電量は落下位置の電界強度に比例するので、帶電量が同じということは電界強度が同じである。したがって、(1)式について数値計算したグラフの図10と同一の実験結果が得られた。

図2, 4に示した負および正のコロナ放電電流密度と鋼球の帶電量の関係を数式で表わすと(3)式のようになる<sup>5,6)</sup>。なお、(3)式から求めた鋼球の帶電量は、図2, 4に示した測定値の  $\pm 5\%$  以内である。

$$Q = AB\sqrt{I} \quad (3)$$

$Q$  : 帯電量

$I$  : コロナ放電電流密度

$A$  : 直流印加電圧の(ピーク値/平均値)

$B$  : 電気集塵装置により与えられる定数

(3)式は(2)式の形に(ピーク値/平均値)の値( $A$ )を掛けたものである。(3)式から、脈動のない直流電圧を印加し、コロナ放電電流密度が  $I_{DC}$  のときの粒子帶電量を  $Q$  とすれば、脈動分を含んだ直流電圧を印加して同じ帶電量  $Q$  を得るためのコロナ放電電流密度は、 $I_{DC}/A^2$  の値にすればよいことになる。

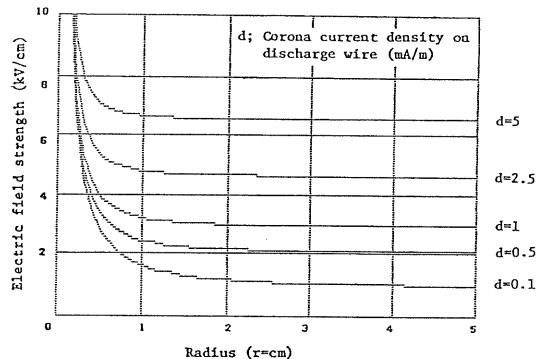


図10 実験に使用したモデル集塵装置のコロナ電流密度をパラメータとしたポアソンの式による電界分布の数値計算結果

Fig. 10 Electric field strength by computer simulation using Poisson's Eq. vs. corona current density.

実際の電気集塵装置において、電極構造の配置および排ガスの性状から火花放電電圧は決まり、火花放電はほぼ印加電圧のピーク値で発生する。集塵装置の種類によっては、単相全波整流電源の出力電圧に含まれる商用周波数の2倍の周波数の脈動電圧が大きいため、火花放電が発生して十分なコロナ放電電流を流すことができない場合がある。このようなときには直流出力側に平滑用コンデンサを挿入するか、または単相全波整流電源を3相全波整流電源に交換していたが、電源装置の脈動電圧を小さくしたときのコロナ放電電流をどのくらい流せば以前の集塵率よりよくなるか、リップル改善効果を評価する簡単な目安がなかった。これまでリップル改善後のコロナ放電電流値の目安は、次のような方法で求めていた。リップル改善以前の脈動分の大きい電源装置で、印加電圧のピーク値とコロナ電流(平均値)、および印加電圧の平均値とコロナ電流(平均値)の2種類の  $V$ - $I$  特性を測定し、また、リップル改善後についても印加電圧のピーク値とコロナ電流、および印加電圧の平均値とコロナ電流の2種類の  $V$ - $I$  特性を測定した。次に、測定したこれらの特性から、両者の(電圧ピーク値×電圧平均値)の値が同じになる電流値を求めていた。これらの測定を実施するためには、現場に多くの測定器の搬入と長期にわたる試験をするため多額の経費を必要とし、実際に行なわれることが非常に少なかった。各集塵装置のコロナ放電  $V$ - $I$  特性および荷電電圧の脈動率が異なるため、ある集塵装置について測定したデータは他の装置について有効に利用できない。したがって、脈動電圧の少ない電源装置に交換しても、コロナ放電電流値をどの程度にすれば、以前よりも集塵性能が向上するか明らかでないまま運転せざるを得なかつた。

電気集塵装置のコロナ放電特性は、実用範囲における近似式として次の(4)式が使用されている<sup>7)</sup>。

$$I = CV^D \quad (4)$$

$V$  : 印加電圧 (kV),  $I$  : コロナ放電電流 (mA),  $C$ ,  $D$  : 定数

集塵効率 ( $\eta$ ) はある仮定のもとに、求められた次式が多く使用されている<sup>8,9)</sup>。

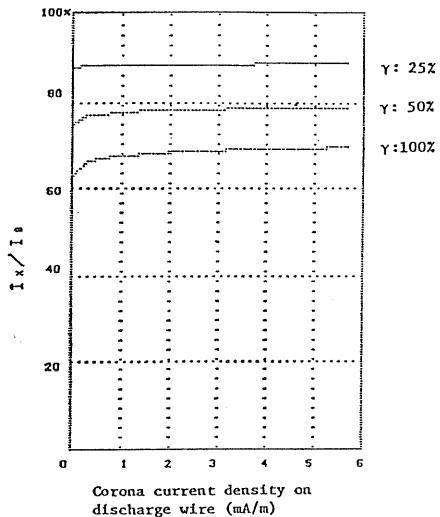


図 11 振動率をパラメータとした放電線コロナ電流密度に対する  $I_x/I_0$  の比の数値計算結果

Fig. 11  $I_x/I_0$  by computer simulation vs. corona current density.

$$\eta = 1 - \exp(-(A/V)w) \quad (5)$$

$A$  : 集塵極面積,  $V$  : 処理ガス量,  $w$  : 粒子の移動速度

粒子の移動速度 ( $w$ ) は [粒子の帶電量 ( $Q$ ) × 荷電電圧の平均値 ( $V_a$ )] に比例するものである。

印加電圧の脈動率を変化させたとき、たとえば単相全波整流電源から三相全波整流電源に交換した場合、集塵効率を向上させるには、単相電源の  $(Q \times V_a)$  よりも三相電源にしたときの  $(Q \times V_a)$  の値を大きくするようなコロナ放電電流を流してやる必要がある。

電気集塵装置に三相電源を使用すると脈動率が 5%以下になるので、ほとんど平坦な直流と見なすことができる。電源の脈動分を変えたときの集塵効率を同一にするためには粒子の移動速度  $w$  を同じ値にする必要がある。平坦な直流電圧でのコロナ放電電流を  $I_0$ 、任意の脈動分を含んだ直流電圧での電流を  $I_x$  とし、 $w$  を同じくするためには(3), (4)式から次式が成立する。

$$B\sqrt{I_0} \cdot (I_0/C_0)^{1/D_0} = AB\sqrt{I_x} \cdot (I_x/C_x)^{1/D_x} \quad (6)$$

$$I_x^{(1/2+1/D_x)} = I_0^{(1/2+1/D_0)} \cdot \frac{C_x^{1/D_x}}{C_0^{1/D_0}} \cdot \frac{1}{A}$$

$$\therefore I_x = \left[ I_0^{(1/2+1/D_0)} \cdot \frac{C_x^{1/D_x}}{C_0^{1/D_0}} \cdot \frac{1}{A} \right]^{\frac{1}{(1/2+1/D_x)}} \quad (7)$$

図 3 に示したコロナ放電  $V-I$  特性について、(7)式から放電線のコロナ放電電流密度に対する  $I_x/I_0$  の比を印加電圧の脈動率をパラメータとして数値計算したもの

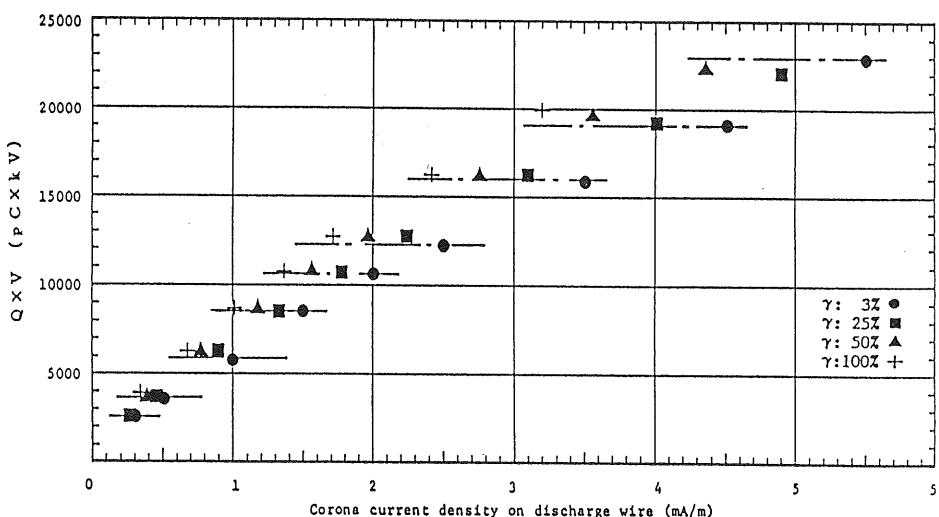


図 12 数値計算した  $I_x/I_0$  の電流による鋼球帶電量の実測値

Fig. 12 Measured charge value on conducting sphere vs. corona current density by computer simulation using Eq. (7).

図 11 に示す。同図から明らかなようにコロナ放電電流の実用範囲では、同じ脈動率における  $I_x/I_0$  の比は、ほぼ一定と見なすことができる。放電線のおののおののコロナ電流密度に対する  $I_x/I_0$  の比を数値計算で算出し、おののおのの脈動率について換算したコロナ電流密度に対する粒子の帶電量を図 2 から求め、図 3 から各電流に対する印加電圧の平均値を換算して  $(Q \times V_a)$  をグラフにしたものと図 12 に示す。同図から明らかなように、(7) 式から求めた電流値に対する  $(Q \times V_a)$  の値は、実測値の約 10% 以内の範囲で求められる。

従来は、単相電源から三相電源に置き換えた場合、また逆のケースについて、コロナ放電電流をどの値以上に流せば集塵効率の向上ができたか明らかでないまま運転していた。それを明らかにしたい場合は、それぞれの集塵装置でコロナ放電  $V-I$  特性を電流（平均値）に対する印加電圧の平均値とピーク値を求めなければならなかつた。

実際の集塵装置において、コロナ放電  $V-I$  特性とその荷電電圧の脈動率がわかれば、電源により荷電電圧の脈動率を任意に変えたときのコロナ放電  $V-I$  特性と荷電電圧のピーク値を、数値計算により近似的に求める方法が筆者らにより明らかにされている<sup>1)</sup>。この手法を組み合わせることにより、本研究で明らかにした(3)式と(7)式から、平坦な直流の印加電圧および任意の脈動率の印加電圧に対するそれぞれの粒子の移動速度を同一にするコロナ電流値を簡単に数値計算で求めることができる。したがって、集塵装置の荷電電圧の脈動分を変更したい場合、高価な高圧電源装置を改造する前に、数値計算により集塵性能を検討できるので、実用上非常に有效であると思われる。

#### 4. 結 言

電気集塵装置の粒子帶電に及ぼすコロナ放電電流と印加電圧波形について検討し、次の結果を得た。

- (1) イオン流が存在するポアソン電界において、イオン衝突による粒子の帶電量は、コロナ電流密度により決まる電界に(印加電圧ピーク値/印加電圧平均値)を掛けた値に比例する。したがって、粒子の帶電量を同じ値にするためには、印加電圧に含まれる脈動分が大きいほどコロナ放電電流が少ない値でよい。

- (2) 印加電圧に含まれる脈動分が異なる場合、同一の粒子の移動速度 ( $w$ ) にするためのコロナ電流値を数値計算により求める式を提案し、実験値とよく合うことが確認できた。

以上の結果、これまで実際の電気集塵装置において、高圧電源を単相から三相、または逆に替えた場合、コロナ放電電流をどの値に設定すればよいか明らかでなかった。本研究により集塵性能を同じくするためのコロナ放電電流値の目安が数値計算で得られるため、実用上非常に有効と思われる。

最後に、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増田研究室鷲津正夫博士、同研究室の皆様方およびオリジン電気(株)の関係各位に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 飯島 歩, 増田閃一: 静電気学会誌, 11 (1987) 110
  - 2) 飯島 歩: 静電気学会誌, 11 (1987) 355, 358
  - 3) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 487, オーム社 (1981)
  - 4) M. Pauthenier and M. Hanot: J. Phys. Radium, 3 (1932) 590
  - 5) 飯島 歩, 増田閃一: 静電気学会講演論文集 '81, No. 16a-B1, p. 1 (1981)
  - 6) A. Iijima: *Second International Conference on Electrostatic Precipitation*, p. 771 (1984)
  - 7) 謹早典夫: 東京大学学位論文, p. 34 (1961)
  - 8) W. Deutsch: Ann. Phys., 68 (1922) 335
  - 9) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, pp. 156-172, Addison-Wesley Publ. Co., Inc., Massachusetts (1963)