

論 文

帶電水滴による微細粒子の高効率捕集に関する実験的研究

原 雅 則*, 住吉谷 覚**, 阿武泰治***

藤本 哲**, 赤崎正則**

(1981年9月1日受理)

Experimental Study on Highly Effective Collection of Fine Particles by a Charged Water Droplet

M. HARA,* S. SUMIYOSHITANI,** Y. AN-NO,***

S. FUJIMOTO** and M. AKAZAKI**

(Received September 1, 1981)

In order to investigate the utility of use of charged water droplets for the capture of fine dust particles and examine our proposed estimation method of collection coefficient for any dusts by the droplet, a test precipitator in which water droplet is falling counter to the air stream containing dusts was constructed. The captured dusts on the water droplet were observed by the universal projector and their amount was measured to compare with the theoretical value. Dusts used are: (1) spore of Lycopodium clavatum ("Sekishoshi" in Japanese) which has the uniform size and is approximately sphere in shape, (2) glass bead which has the spherical shape and the size distribution, and (3) dust for industrial testing No. 11 which has an irregular shape and is poorly dispersive. It is found that charges on water droplet and dusts are very significant factors for the increase in the collection coefficient and measured mean values of the collection coefficient agree well with the theoretical ones by the previously proposed simulation method by the authors.

1. まえがき

従来、帶電水滴による帶電微細ダスト粒子の捕集に関して、帶電水滴ならびに帶電ダスト粒子がともに球形であり、かつ均一粒径を持つとして実験と理論の両面から検討がなされてきた¹⁻⁴⁾。

これに対し、一般にはダスト粒子は球形でなく、また均一粒径を持つとは限らないので、著者らはダスト粒子が球形でない場合、あるいは球形で粒径に分布を持つ場合の帶電水滴によるダスト粒子捕集過程のシミュレーション法を提案した⁵⁾。そのおもな考え方は次のようである。

- (i) 粒子形状が球または球に近い形で、分散性が良いダストで粒径に分布がある場合には、粒子径に従って粒子をいくつかのグループに分割し、代表径を持つ球形粒子に対してダスト捕集過程のシミュレーションを行なう。
- (ii) 粒子形状が不定形であるかまたは分散性の悪さから凝集を起こしやすいダストの場合、ダスト粒子の帶電水滴のまわりでの運動に関する実効粒径は不明な場合が多い。これに対しては、帶電水滴電荷の逆極性帶電ダスト捕集による中和量ならびにダスト粒子の有する比電荷 (= 単位質量のダスト上の電荷量) 特性の測定が容易であることに着目し、これを基にダスト粒子の水滴のまわりでの運動に関する実効平均直径を決定する。すなわち、与えられた水滴条件 (水滴径と初期電荷量) とダスト条件 (ダスト粒子の密度、比電荷と集じん空間の含じん量) の下でダストの実効平均直径を仮定して中和を考慮したダスト捕集過程のシミュレーションを行なうことにより実効平均直径の関数としての水滴電荷中和量特性を求めておき、実測の水滴電荷中和量と一致する条件からダスト

*,**,*** 九州大学 (812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Kyushu University, 10-1, Hakozaki 6-chome,
Higashiku, Fukuoka, 812 Japan

* 工学部電気工学科 Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering

** 大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻 Department of Energy Conversion Engineering,
Graduate School of Engineering Sciences

*** 専修生 (現在、宇部興産) Special Student (at present,
Ube Industries, Ltd.)

粒子の実効平均直径を決定する。この実効平均直径を用いて各種の条件下における水滴のダスト捕集係数の推定を行なう。

そこで、今回著者らはこれらのシミュレーション法の有効性を実証するとともに、帶電水滴による微細粒子捕集法の有効性を調べる目的で、長さ 1,200 mm、断面積 $150 \times 180 \text{ mm}^2$ の集じん空間を持つ試験用集じん装置を試作し、集じんテストセル中からダスト粒子捕集前後の水滴を抽出して、その比電荷特性の測定ならびに個々の水滴上のダストを直接観測する手法を用いてダストの捕集状況および水滴のダスト捕集係数に関する一連の実験研究を行なった。本論文は、それらの実験結果と前報⁵⁾で提案したシミュレーション法の有効性を示すものである。

2. 使用した記号および実験の装置と方法

2.1 記号

本論文で使用した記号を便利のために次にまとめて示す。

$D_{\text{p eff}}$: ダスト粒子の水滴のまわりでの運動に関する実効平均直径 (μm)

M_{p} : ダスト粒子の比電荷 (C/kg)

M_w : 水滴の比電荷 (C/kg)

Q_w : 水滴上の電荷量 (C)

R_w : 水滴の半径 (mm)

I_{p} : ダスト粒子予備荷電部のコロナ電流 (μA)

V_{p} : ダスト粒子予備荷電部の印加電圧 (kV)

V_w : 帯電水滴形成針先の印加電圧 (kV)

y : 水滴中心からダストの流れの方向に垂直な方向への距離 (座標) (mm)

y_{00} : ダスト粒子臨界弾道の初期 y 値 (mm)

z : テストセル最上端から水滴の落下方向への距離 (座標) (mm)

H : 水滴のダスト粒子捕集量の測定値

η : 水滴のダスト粒子捕集係数の理論計算値

η_R : 相対的な、水滴のダスト粒子捕集係数

2.2 実験の装置と方法

実験装置の概略を図 1 に示す。テストセル（集じん空間）は断面積が $150 \times 180 \text{ mm}^2$ 、長さが 1,200 mm の方形ダクトであり、その内壁は電気的境界を明確にするとともに実用の集じん装置の場合を想定して大地電位とした。

帶電水滴は注射針対穴あき平板電極系における高電圧 V_w 印加の注射針から水道水を落下させることにより形成した。この場合、後にも述べるように含じん空気の流れと水滴の落下の向きとが逆向きであることから、帶電

水滴には空気流に逆らって落下する大きさが必要である。そこで、直径が $500 \mu\text{m}$ 程度の帶電水滴を安定に得るために、針には外径 $0.4 \text{ mm}\phi$ 、内径 $0.2 \text{ mm}\phi$ で先端を平らに加工した針長 10 mm のものを用い、ギャップ長は 40 mm とし、360 mm Aq の水圧で水を針電極に供給した。なお、使用した水道水の導電率は 20°C で約 $270 \mu\text{S/cm}$ であり、 $310 \times 400 \text{ mm}^2$ の平板には針先直下に $31 \text{ mm}\phi$ の穴が設けてあり、この穴を通してテストセル内に水滴を導入した。

ダスト粒子は回転式のダストフィーダーから毎秒一定量供給され、送風量 38l/s の押込みファンで高速攪拌、空気と混合の後、中心導体 $0.27 \text{ mm}\phi$ 、円筒内径 $25 \text{ mm}\phi$ 、長さ 55 mm の円筒同軸電極配置からなるダスト予備荷電部に送られる。コロナ発生電極である中心導体には直流高電圧 V_p が印加され、コロナによる電離空間内で荷電されたダスト粒子はテストセル下部から上部に向かっ

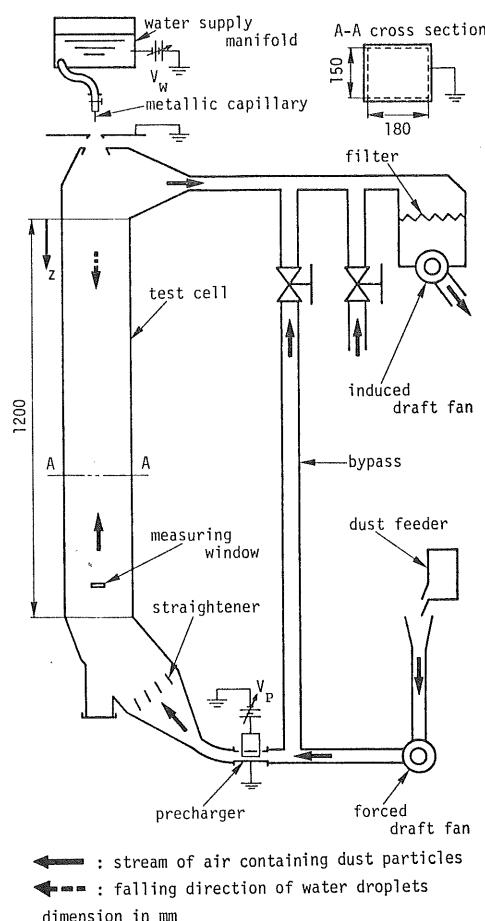


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental set up.

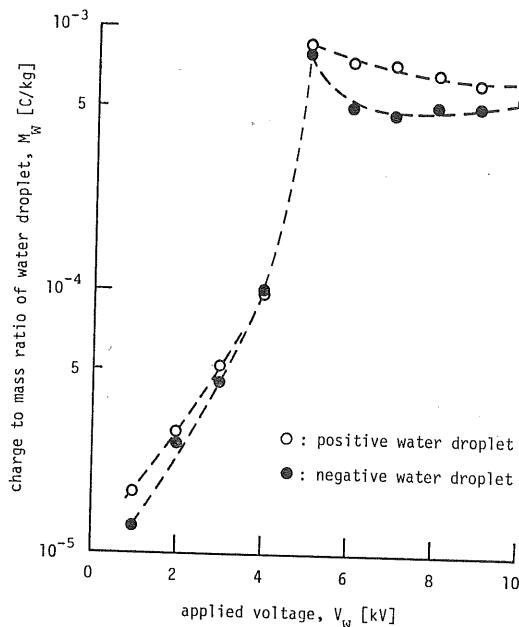


図 2 水滴の比電荷特性

Fig. 2 Charge to mass ratio of water droplet.

て空気とともに流される。すなわち、セル内での水滴の落下とダスト粒子の流れの向きは逆向きになっている。

テストセル内落下中にダスト粒子を捕集した水滴は、テストセルの下部 ($z=1,100 \text{ mm}$) に設けた $10 \times 30 \text{ mm}^2$ の水滴採取口から挿入したアルコールで拭いたスライドグラス上に受け、プロジェクタ (Nikon Profile Projector Model 6CT-2) により 100 倍に拡大して観測した。なお、必要に応じてプロジェクタ付属の写真撮影装置を用い、水滴のダスト捕集状況を記録した。

水滴条件とダスト条件決定に関連する実験方法は次節で述べる。

3. 実験条件の設定

3.1 帯電水滴条件

針先の印加電圧が低い場合は、針先で形成されたすべての帶電水滴は平板に設けた穴を通ってテストセルに入る。一方、印加電圧が高くなると静電霧化現象により水滴が針先から円錐状に広がって落下するため、水滴の大部分は穴を通してテストセル内に入るが一部は平板上にトラップされる。図 2, 3 はテストセル中で測定した水滴の比電荷 M_w と半径 R_w をそれぞれ V_w の関数として示したものである。 M_w は形成された帶電水滴をエレクトロメータ (TR-8651) に接続したファラデーベージ (TR-8031) 内のカップに受け、カップに溜まった

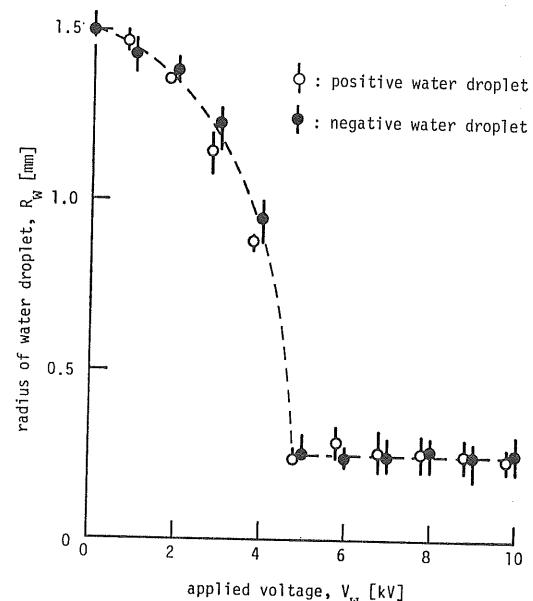


図 3 水滴の半径特性

Fig. 3 Radius of water droplet.

水滴上の電荷の測定値をその水量で除することにより求めた。図 2 より明らかなように正負両極性とも M_w は V_w が 5 kV 付近でピークを持ち、6~10 kV の範囲ではほぼ一定の値を示している。

R_w は形成された帶電水滴をスライドグラス上に塗布した粘度約 5,000 cSt のシリコンオイル中に受け、プロジェクタで 20 倍に拡大して測定した。なお、図 3 における縦のバーは各 V_w に対して測定した水滴 50 個の R_w の分布範囲であり、丸印はその平均値である。図 3 より明らかなように、正負両極性とも R_w は V_w が 5 kV 程度までは V_w の増加とともに急に減少するが、それ以上ではほぼ一定の値となる。

ダスト粒子の高効率捕集のためには M_w の値が大きいことが望ましく、また、捕集量の定量化と理論計算結果との比較のためには水滴条件 (R_w , M_w ならびに供給量) が安定していることが必要である。

以上の観点から図 2, 3 の帶電水滴特性を見ると、 V_w が 7~9 kV の間で R_w がほぼ一定に揃っており、しかも M_w が大きく安定しているので、本研究では後に述べるダストの帶電特性と関連して V_w の極性を負に選び、 $V_w = -8 \text{ kV}$ を実験条件とした。この場合の R_w は 0.265 mm, M_w は $-5.07 \times 10^{-3} \text{ C/kg}$ であり、 Q_w は $-3.95 \times 10^{-11} \text{ C}$ である。

3.2 ダスト条件

まえがきでも触れたように、先に報告した帶電水滴によるダスト捕集過程のシミュレーション⁵⁾ではダストと

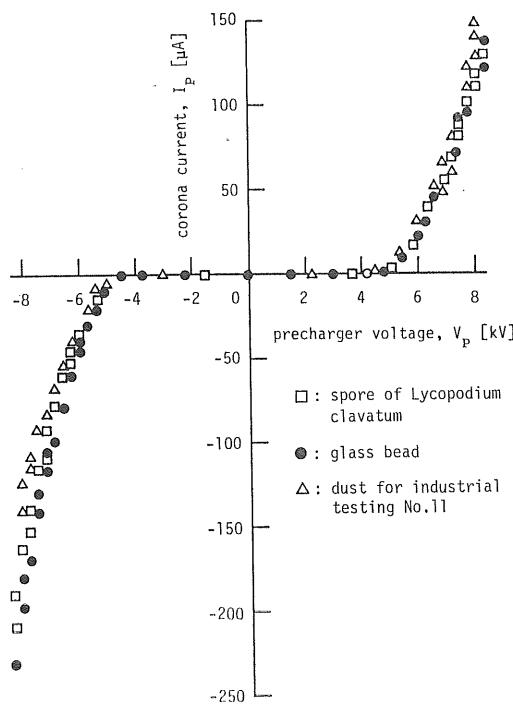


図 4 荷電部のコロナ電流-印加電圧特性

Fig. 4 Characteristics of corona current against applied voltage in precharger.

して、(i) 分散性が良く、球形に近い均一粒径のダスト粒子、(ii) 分散性が良く、球形で粒径が分布しているダスト粒子、(iii) 不定形で分散性の悪いダスト粒子を仮定していた。ここではこれらの特性を持つダスト粒子として次のようなものを用いた。すなわち(i)のダスト粒子として石松子(固め嵩密度 0.477 g/cm^3 , 単純平均径 $32 \mu\text{m}$)を、(ii)のダスト粒子としてガラスビーズ GB986-R1(真密度 2.37 g/cm^3 , 最頻度粒子径 $18.2 \mu\text{m}$)を、また(iii)の粒子としては不規則形状で分散性の悪い試験用ダスト 11 種(JIS Z 8901, 真密度 3.0 g/cm^3 , 中位径 $2 \mu\text{m}$)を用いた。各ダスト粒子の供給量は次のようにして決定した。石松子、ガラスビーズの場合、水滴のダスト捕集量の定量化は個々の水滴上の粒子個数を直接数えることによって行なったが、このとき 1 個の水滴上の粒子個数が著しく多くならないようにダスト供給量は石松子の場合には 5.52 mg/s 、ガラスビーズの場合には 18.6 mg/s とした。また試験用ダスト 11 種の場合には、後にも示すように、粒子個数を直接数えることが困難であることから、帶電水滴を用いた工業用集じん装置で生じるであろう含じん量(2 g/m^3 以下)を目安とし、 39.4 mg/s とした。この場合、テストセル内での含じん量は石松子、ガラスビーズ、試験用ダスト 11 種に対し

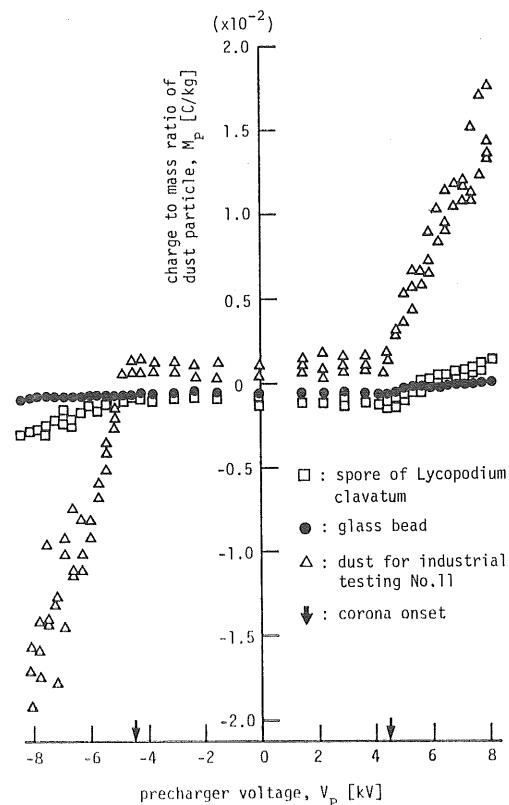
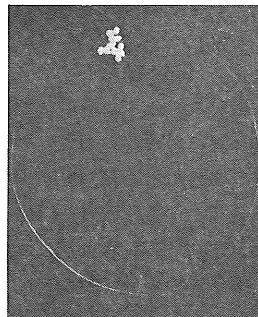


図 5 ダストの比電荷特性

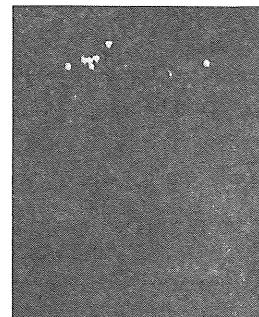
Fig. 5 Charge to mass ratio of dust particle.

てそれぞれ 0.145 , 0.489 , 1.04 g/m^3 である。

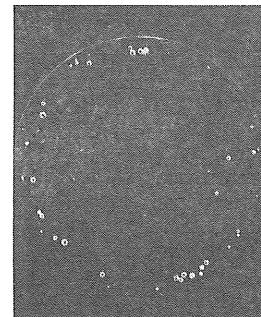
各ダスト粒子を上記の条件で供給した場合の予備荷電部でのコロナ電流 I_p を印加電圧 V_p の関数として示したのが図 4 である。図より明らかなように、正負両極性とも V_p が 4.5 kV 付近でコロナ電流が流れはじめ、その後 I_p は V_p とともに増加する。供給ダストの種類によるコロナ開始電圧への影響はなく、コロナ電流特性もほぼ等しい。なお、荷電部内壁へのダストの付着は試験用ダスト 11 種の場合に若干見られたが、他の粒子の場合にはほとんど見られなかった。予備荷電部では、正負両極性とも V_p が 8.5 kV 付近からフラッシュオーバーが起こりはじめ、安定な荷電ができなくなる。このような荷電部で荷電されたダスト粒子の比電荷特性を、試作した吸引式ファラデーカップ⁶⁾を用いて測定した結果が図 5 である。この場合、測定されるダストの比電荷はファラデーカップに吸引されたダスト粒子全体に対する平均値である。図より明らかなように、どの粒子の場合にも I_p がゼロ、すなわち V_p が $-4.5 \sim 4.5 \text{ kV}$ の間では、 M_p は V_p の変化に無関係にはほぼ一定のゼロでない値を示し、 I_p が正または負に増加するとともに正または負の



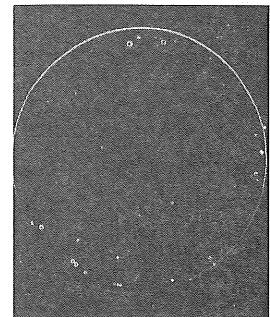
(a)



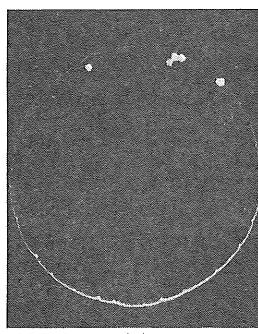
(b)



(a)



(b)



(c)

$V_w = -8.0$ [kV]
(a) $V_p = 8.0$ [kV]
 $M_p = 1.15 \times 10^{-3}$ [C/kg]
(b) $V_p = 0$ [kV]
 $M_p = -0.85 \times 10^{-3}$ [C/kg]
(c) $V_p = -8.0$ [kV]
 $M_p = -2.85 \times 10^{-3}$ [C/kg]

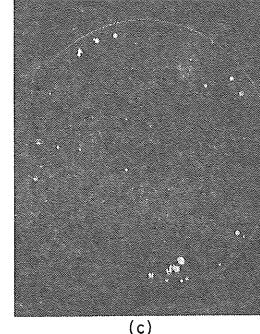
図 6 帯電水滴に捕集された各種帶電条件下の石松子粒子
Fig. 6 Captured spores of *Lycopodium clavatum* with different charge to mass ratios on a charged water droplet.

変化を示す。すなわち、各ダスト粒子はそれぞれ固有の $(M_p)_{I_p=0}$ の値を示し、その値は石松子の場合で -8.5×10^{-4} C/kg、ガラスビーズの場合で -5.51×10^{-4} C/kg、試験用ダスト 11 種の場合で $+1.07 \times 10^{-3}$ C/kg である。これらはダスト粒子相互の、あるいはダスト粒子と配管壁、荷電部電極との接触摩擦による帶電であると考えられる。

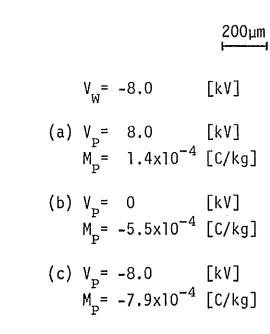
実際の工業用集じん装置ではダストは負に帶電させる場合が多く、その意味からすれば水滴の帶電極性として正極性を選ぶことも考えられる。しかし図 5 に示されるように、今回用いた小型の荷電装置では、正の Hermstein グローコロナを使用するほうがダストの帶電量にばらつきが少ない。そこでおもな実験はダスト粒子を正極性に、水滴を負極性に帶電させて行なった。

3.3 ダストおよび水滴のテストセル内速度

一般の電気集じん装置内のガス流速は 2 m/s 程度以下に抑えられている。図 1 の実験装置では、バイパスのバルブを開閉することにより、テストセル内の空気流速を 1~1.5 m/s 程度の範囲で変化させることができる。ここではダスト粒子の流速を -1.25 m/s とし、水滴の落下速度は 2.00 m/s である (z 座標で)。なお、これ



(a)



(b)

(c)

図 7 帯電水滴に捕集された各種帶電条件下的ガラスビーズ粒子
Fig. 7 Captured particles of glass bead with different charge to mass ratios on a charged water droplet.

らの速度は以下のようにして測定した。

セル内の $z=0$ と $z=1,200$ mm の位置にそれぞれ断面が 20×100 mm² のアルミプローブ電極を挿入し、その端子を 2 チャンネルオシロスコープのそれぞれの入力端子と接続した。帶電した水滴またはダスト粒子群が各電極を通過すると電極への誘導電荷によりパルスが発生するので、両端子の信号の時間差でプローブ電極間距離を除してそれぞれの運動速度とした。

4. 実験の結果と検討

4.1 帯電水滴によるダスト粒子捕集状況の顕微鏡観察

すべての実験は先に示したように V_w を -8 kV として V_p を変化させて行ない、水滴は $z=1,100$ mm の位置でアルコールで拭いたスライドグラス上に採取し、プロジェクタで 100 倍に拡大してそのダスト捕集状況を観察、撮影した。

供試ダストとして石松子、ガラスビーズ、試験用ダスト 11 種を用いた場合の実験結果の代表例をそれぞれ図 6, 7, 8 に示す。いずれの場合にも (a) がダスト粒子を水滴の帶電と逆極性に荷電した場合 ($V_p = +8$ kV), (b) が

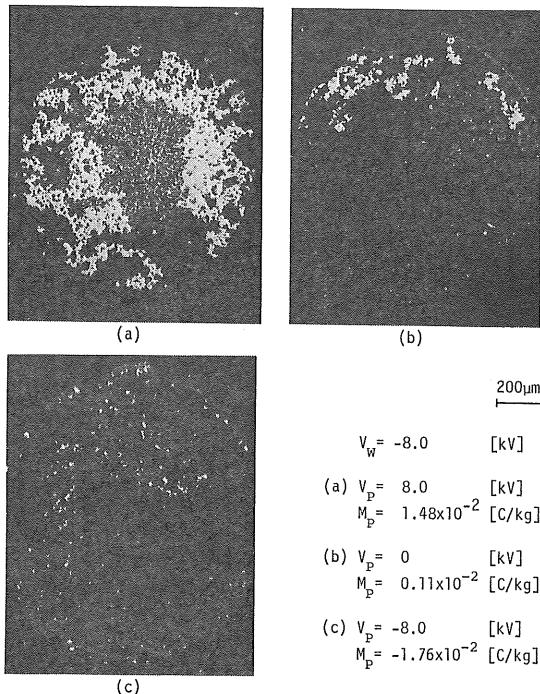


図 8 帯電水滴に捕集された各種帶電条件下の試験用ダスト 11 種粒子

Fig. 8 Captured particles of dust for industrial testing No. 11 with different charge to mass ratios on a charged water droplet.

ダスト粒子荷電電圧をゼロにした場合 ($V_p=0$ kV), (c) がダスト粒子を水滴の帶電と同極性に荷電した場合 ($V_p=-8$ kV) の水滴 1 個のダスト捕集状況を示している。すなわち、図中の円形の輪郭（や見えにくくなっている）がスライドグラス上の水滴の輪郭を示しており、白く写っている粒々が水滴に捕集されたダスト粒子である。この写真撮影に用いたプロジェクタのレンズの焦点深度が浅いため、鮮明なダストの写真を撮るためにできるだけダストが同一平面上にあることが望まれた。このために、図 6, 7, 8 の水滴は、アルコール拭きしたスライドグラス上にサンプリングされたので、グラス上の水滴は球形でなく、したがって、水滴輪郭の直径は球形の状態下で測定した $2R_w (=530 \mu\text{m})$ より大きくなっている。

図 6 の石松子の場合、 M_p は(a)の場合で 1.15×10^{-3} C/kg, (b) の場合で -0.85×10^{-3} C/kg, (c) の場合で -2.85×10^{-3} C/kg である。この場合、水滴が乾燥した後では水滴輪郭が識別できなくなるので、写真撮影は水滴乾燥前に行なった。本図からも明らかであるが、捕集ダスト粒子数は、各荷電条件下における全測定値をそれぞれ平均すると(b)の場合の 7.3 個と比較して、(a)の場合

で 11.7 個、(c)の場合で 4.3 個であり、著しい差異は認められない。

図 7 のガラスビーズの場合、 M_p は(a)の場合で 1.4×10^{-4} C/kg, (b) の場合で -5.5×10^{-4} C/kg, (c) の場合で -7.9×10^{-4} C/kg である。この場合も水滴が乾燥した後では水滴輪郭が識別できなくなるので、写真撮影は水滴乾燥前に行なった。本図からも明らかであるが、捕集ダスト粒子数は各荷電条件下における全測定値をそれぞれ平均すると(b)の場合の 37.4 個と比較して、(a)の場合に 47.5 個、(c)の場合に 33.8 個であり、石松子の場合と同様に著しい差異は認められない。ただし、粒子個数の測定は粒子径に無関係に行なった。

図 8 の試験用ダスト 11 種の場合、 M_p は(a)の場合で 1.48×10^{-2} C/kg, (b) の場合で 0.11×10^{-2} C/kg, (c) の場合で -1.76×10^{-2} C/kg である。この場合、顕微鏡観察によると捕集された粒子は水滴上に浮遊し、運動しているため、水滴乾燥前に写真撮影を行なうと粒子が不明瞭になる。そこで写真撮影は水滴乾燥後に行なった。本図から明らかなように、捕集ダスト粒子量は(b)の場合と比較すると、(a)の場合には著しく増加しており、(c)の場合には著しく減少している。

これらの実験結果より、帶電水滴によるダスト粒子捕集法が微細なダスト粒子に対して非常に有効であることがわかる。

4.2 帯電水滴によるダスト粒子捕集係数

帶電水滴によるダスト捕集量を定量化する方法の一つとして、図 6, 7, 8 に代表されるような顕微鏡写真において水滴に捕集されたダスト粒子の個数を数える方法を考えられる。先に示したように、図 6, 7 の石松子、ガラスビーズについては粒子個数を数えることが容易にできる。しかし、図 8 の試験用ダスト 11 種の場合のように粒子が微細となり、粒子間の境界がはっきりしない場合には、捕集粒子個数の絶対値を知ることが困難となる。しかし、試験用ダスト 11 種の場合、顕微鏡観察によると、水滴に捕集されたダスト粒子は水滴乾燥前には水滴表面に浮遊しており、よく分散した状態で水滴が乾燥することから、水滴乾燥後のダスト粒子はスライドグラス上にほぼ 1 層になっていると考えられる。そこで、水滴 1 個当たりのダスト捕集量は図 8 のような写真的白い部分の面積に比例していると見なすことができる。

そこで、図 6, 7, 8 のような写真的水滴 1 個当たりのダスト捕集量を統一的に表現し、後のシミュレーション値との比較に便利なように、種々の V_p に対する水滴のダスト粒子捕集量を $I_{p=0}$ の領域における水滴のダスト粒子捕集量で規格化して次のように表現した。

$$\eta_R = (H)_{V_p} / (\bar{H})_{I_{p=0}} \quad (1)$$

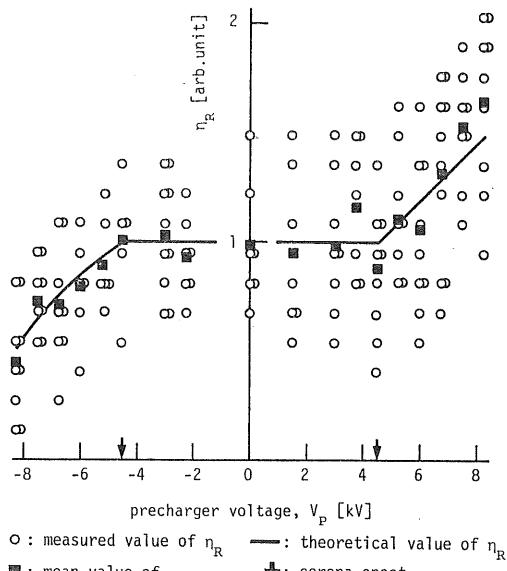


図 9 石松子に対する帶電水滴の相対捕集係数

Fig. 9 Relative collection coefficient by a charged water droplet for spore of *Lycopodium clavatum* as a function of the precharger voltage.

ただし、 η_R は相対的な、水滴のダスト粒子捕集係数、 $(H)_{V_p}$ は各種の V_p に対する水滴 1 個当りのダスト粒子捕集量、 $(\bar{H})_{I_p=0}$ は $I_p=0$ の領域における水滴 1 個当りのダスト粒子捕集量の平均値である。また、「水滴 1 個当りのダスト粒子捕集量」としては石松子、ガラスビーズの場合には粒子個数であり、試験用ダスト 11 種の場合には図 8 のような写真でダストを示す白い部分の面積である。

図 6, 7, 8 と同様な多数の顕微鏡写真から、石松子、ガラスビーズ、試験用ダスト 11 種に対して η_R を V_p の関数として求めるとそれぞれ図 9, 10, 11 の白丸のごとくなる。これらの測定値は図のようにかなり広い範囲に分布しているが、これはおもにダスト供給系統のパイプ部分の付着ダストの剥離などによる不均一ダスト供給ならびにダストと水滴の衝突過程における確率現象によっていると考えられる。しかし、それらの値を各 V_p に対して平均すると各図中の ■, ●, ▲ のようになり、次のような明瞭な傾向が見られる。すなわち、図 9, 10, 11 に矢印で示したコロナ開始点との対応からわかるように、図 4 の $I_p=0$ に対応する領域では η_R はほぼ一定で、 $I_p>0$ に対応する領域では V_p の増加とともに η_R は増加している。また、 $I_p<0$ に対応する領域では図 9, 10 からわかるように η_R は V_p の負方向への増加とと

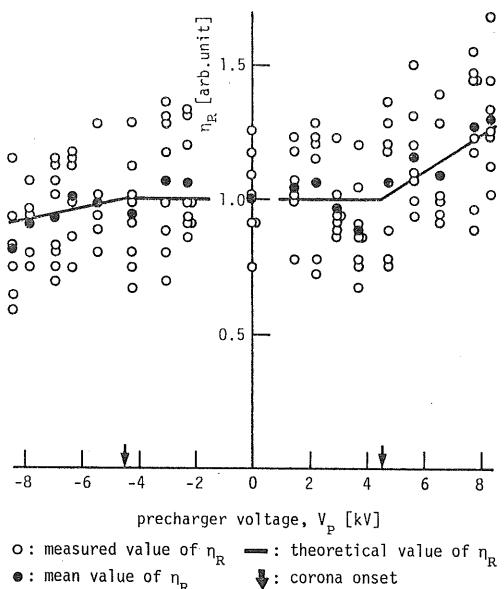


図 10 ガラスビーズに対する帶電水滴の相対捕集係数

Fig. 10 Relative collection coefficient by a charged water droplet for glass bead as a function of the precharger voltage.

にも減少している。図 11 では $I_p<0$ に対応する領域での測定値が少ないが、これは試験用ダスト 11 種の場合、ダスト上の電荷によるテストセル内の空間電荷密度が他の粒子の場合より高く、 $I_p<0$ に対応する領域になると水滴がダストと同極性電荷をもつことから水滴が壁方向に拡散し、 $z=1, 100 \text{ mm}$ に至る以前に壁に付着するためである。

$I_p>0$ に対応する領域で I_p の値が大きくなると、水滴とダスト粒子間のクーロン引力の効果が大きくなるのは明らかであるが、この効果は図 9, 10, 11 の比較から明らかなように粒径の小さい試験用ダスト 11 種の場合にとくに顕著である。

4.3 検 討

前報の帶電水滴によるダスト粒子捕集に関するシミュレーション法⁵⁾においては、先に述べた各種のダストに対する水滴のダスト粒子捕集係数 η を

$$(\eta)_{Q_p} = (y_{00}^2 / R_w^2)_{Q_p} \quad (2)$$

として求めた。これを実験値と比較するには次のようにすれば良い。いま、

$$(\eta_R)_{\text{theoretical}} = (\eta)_{Q_p(V_p)} / (\eta)_{Q_p(I_p=0)} \quad (3)$$

を取ると、この値は明らかに(1)式と同じ量であり実験値との直接の比較が可能である。ところで $(\eta)_{Q_p}$ の計算は Q_p の値を仮定して進められるが、図 4 に I_p-V_p 特性が求まっており、また図 5 と粒子径 (グループ分け

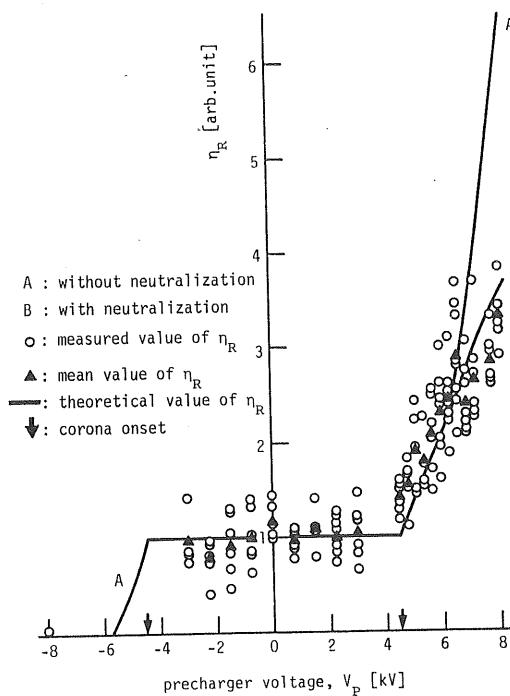


図 11 試験用ダスト 11 種に対する帶電水滴の相対捕集係数

Fig. 11 Relative collection coefficient by a charged water droplet for dust for industrial testing No. 11 as a function of the precharger voltage.

したときの代表径または実効平均直径) より $Q_p - V_p$ 特性が得られるので $(\eta)_{Q_p(V_p)}$ および $(\eta)_{Q_p(I_p=0)}$ を容易に求めることができる。

本節で述べるシミュレーションにおいて用いた値は、すべて実験条件の節で示した値と同じである。

4.3.1 石松子

石松子の場合、粒子は球形に近く、粒径は均一で分散性が非常に良い。この場合は均一粒径の球形ダスト粒子と球形帶電水滴の場合の帶電水滴によるダスト粒子捕集に関するシミュレーション法を用いることができる。また、 $V_p = 8 \text{ kV}$ のときの水滴のダスト捕集量を水滴電荷のダスト捕集による中和を考慮せずに求め、このときの水滴電荷の中和量を逆算すると $9.5 \times 10^{-14} \text{ C}$ となり、 $(Q_w)_{\text{initial}}$ の $-3.95 \times 10^{-11} \text{ C}$ に比べて無視できることがわかる。したがって中和を無視して η_R を計算して良い。その結果は図 9 の実線のようになり、かなり良い一致を示している。ところで石松子の場合、先に示したように水滴の捕集ダスト量の定量化においては捕集ダスト粒子数を直接数えた。理論的には η 、水滴の含じん空間内走行距離と含じん量が既知であれば、水滴に捕集さ

れるダスト粒子数を直接計算することができる。そこで図 6 の (a), (b), (c) の条件に対して計算を行なうと、(a) の場合で 10.1 個、(b) の場合で 7.0 個、(c) の場合で 3.9 個となり、先に示した測定値との比較からわかるように帶電水滴のダスト捕集の絶対量においても実験測定値とかなり良く一致していることがわかる。

4.3.2 ガラスビーズ

ガラスビーズの場合、粒子は球形であり、分散性は良いが粒径が分布している⁷⁾。この場合は前報⁵⁾の粒径に分布がある場合のシミュレーション法、すなわち粒子を粒径に従っていくつかのグループに分割し、それぞれのグループに対して水滴のダスト粒子捕集係数を求めた後にダスト全体に対する水滴のダスト粒子捕集係数を求める方法を適用できる。今回の実験条件の場合、石松子の場合と同様に $V_p = 8 \text{ kV}$ に対する水滴のダスト粒子捕集量を水滴電荷の中和を考慮せずに求め、このときの水滴電荷の中和量を逆算すると $3.7 \times 10^{-14} \text{ C}$ となり、水滴電荷の中和は無視できる。これらを考慮して水滴のダスト粒子捕集過程のシミュレーションを行ない η_R を求めると図 10 の実線のようになり、かなり良い一致を示している。ところでガラスビーズの場合にも、石松子の場合と同様に水滴の捕集ダスト量定量化においては捕集ダスト粒子数を直接数えた。そこで図 7 の (a), (b), (c) の条件に対して、水滴に捕集されるダスト粒子数を計算すると (a) の場合で 51.4 個、(b) の場合で 41.4 個、(c) の場合で 38.2 個となり、先に示した測定値と比較すると、この場合もかなり良い一致を示していることがわかる。

4.3.3 試験用ダスト 11 種

試験用ダスト 11 種の場合、粒子は不規則形状であり分散性が悪いことから、ダスト粒子の水滴近傍での運動に関する実効粒径は不明であり、シミュレーションに際してはまず実効平均直径 $D_{p,\text{eff}}$ を求める必要がある。そこで、前報⁵⁾で提案した水滴電荷の逆極性帶電ダスト捕集による中和量から $D_{p,\text{eff}}$ を求めると次のようになる。

いま、ダストを供給した状態でテストセル最下部において Q_w を V_p の関数として測定すると図 12 のプロットのごとくなる。一方、 $D_{p,\text{eff}}$ をたとえば、 $2 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ と仮定して Q_w を求めるシミュレーションを行なうと、それぞれ図 12 の実線 I, II のようになり、 $D_{p,\text{eff}} = 4 \mu\text{m}$ の場合が実験値と良く合っている。そこで、ここでは試験用ダスト 11 種の実効平均直径を $4 \mu\text{m}$ と決定した。なお、 $V_p = 0 \sim 4.5 \text{ kV}$ ($I_p = 0$ の領域に対応する) でシミュレーション値に差があるのは図 5 に示したように $I_p = 0$ の領域でも $M_p \neq 0$ であるために水滴電荷の中和が存在し、その値が仮定した $D_{p,\text{eff}}$ の値によつて異なるためである。

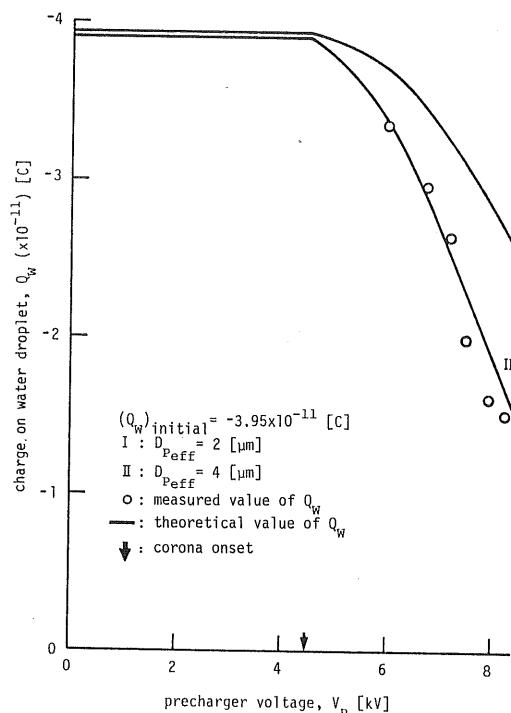


図 12 水滴電荷の中和を用いた試験用ダスト 11 種の実効平均直径 D_{eff} の決定

Fig. 12 Determination of the effective mean-diameter D_{eff} of dust for industrial testing No. 11 by using the charge neutralization on a water droplet.

この D_{eff} を用いて η_R を求めると、中和を考慮しなかった場合と考慮した場合に対してそれぞれ図 11 の実線 A, B のようになり、中和を考慮しない場合は、考慮した場合より η_R の値が著しく大きく見積もられることがわかる。また、図より明らかなように、中和を考慮した場合の η_R の理論計算値は実験値とかなり良い一致を示している。ところで試験用ダスト 11 種の場合、先に示したように水滴の捕集ダスト量の定量化において、捕集ダスト粒子数を直接数えることは行なわなかった。しかし、理論的には石松子、ガラスピーズの場合と同様に水滴 1 個当りの捕集ダスト粒子数を計算することができる。すなわち、 $D_{\text{eff}}=4 \mu\text{m}$ として、図 8 の (a), (b), (c) の条件に対して、水滴電荷の中和を考慮して水滴に捕集されるダスト粒子数を計算すると、(a) の場合で 1.17 ×

10^4 個、(b) の場合で 3.29×10^3 個、(c) の場合で 0 個となる。

5. む す び

前報⁵⁾で提案した帶電水滴によるダスト捕集に関するシミュレーション法を検証するとともに帶電水滴による微細ダスト粒子捕集の有効性を調べる目的で小型の帶電水滴を用いた集じん装置を試作し、ダスト捕集に関連する各種の実験と捕集量の測定を行なった。そのおもな結果をまとめると次のとくである。

- (1) 帯電水滴によるダスト捕集法は微細なダストに対して非常に有効である。
- (2) 水滴のダスト捕集係数の実験値と理論計算値とを比較すると、各ダスト粒子に対してそれぞれにかなり良い一致が見られ、前報⁵⁾で提案したシミュレーション法が有用であることが確かめられた。

本研究では、水滴 1 個に着目してダスト捕集量に対する静電的効果を調べたが、工業用集じん装置においては集じん空間内における水滴の集団としての振舞、水滴上の電荷による空間電荷集じん作用等の検討が必要と考えられ、今後、これらを含めて装置全体の集じん効率の推定法と効率向上策について検討する予定である。

最後に、有意義なご討論をいただいた東京大学増田閃一教授ならびに卒業研究として実験に協力された岡田智章君（現在本学大学院生）に感謝いたします。また、本研究は文部省科学研究費環境科学特別研究（気相班、研究代表者：東京大学増田閃一教授）の援助によった。

参 考 文 献

- 1) H.F. Kraemer and H.F. Johnstone : Ind. Eng. Chem., 47 (1955) 2426
- 2) M.J. Pilat : J. Air Pollut. Control Assoc., 25 (1975) 176
- 3) K.A. Nielsen and J.C. Hill : Ind. Eng. Chem., Fundam., 15 (1976) 157
- 4) J.R. Melcher, K.S. Sachar and E.P. Warren : Proc. IEEE., 65 (1977) 1659
- 5) 原 雅則、住吉谷覚、赤崎正則：静電気学会誌, 6 (1982) 163
- 6) 原 雅則、阿部泰治、住吉谷覚、藤本 哲、赤崎正則：昭和 55 年電気四学会九州支部連合大会, No. 105 (1980)
- 7) 日本粉体工業協会：粉体物性試験報告書 (1974)