研究報告

電気集じん装置における微粉体の 静電凝集現象について*

Electrostatic Agglomeration of Fine Particles in
the Electrostatic Precipitator

奥田 聰**
Satoshi Okuda

高野 頌**
Hiroshi Takano

村上 雅章**
Masaaki Murakami

1. 緒 言

コロナ放電場中の微粉体は、放電によって積極的な荷電を受けて、クーロン作用力や、静電分極による双極子モーメント作用力のような静電的作用力によって、個々の粒子同志が衝突し、凝集を引き起こす。微粉体の凝集には、ブラウン運動による場合、乱流場における場合、静電場における場合があるが、静電界中において、その静電気作用力が大きい場合には、凝集の程度は大きくなると考えられる。事実、Flossmann-Schütz¹⁾は電気集じん装置の研究において、電界強度を 1.5 kV/cm, 1.9 kV/cm 加えた場合に酸化鉄エーロゾルの粒子個数濃度が数秒の間に急激に減少し、また、電界強度が大きいほど粒子個数濃度の減少量が大きいという現象を見つけ、それが静電凝集によるものであると結論づけている。われわれも前報²⁾において、集じん極に捕集された微粉体の顕微鏡写真による観察によって、同様の現象を見出した。特に、高電圧を印加電圧として用いた場合に、この静電凝集が顕著であること、さらに、凝集粒子径が滞留時間の経過とともにある一定の値に近づくことを報告した。

本報では、凝集粒子径の経時変化について、印加電圧と含じん濃度をパラメータとして実験を行なった結果、いくつかの知見を得たので報告する。また、捕集された粉体の重量分布から、静電凝集速度定数を算出した。

2. 実験装置および方法

実験装置のフローシート、装置本体の概略を Fig. 1, Fig. 2 に示す。集じん装置本体は、円筒状の集じん極

とその同心軸に多数の針状放電極をもち、150 kV という高電圧を印加電圧として用いる AP 型（エアロピュール型）電気集じん装置である。塔入口の形状は、全円周渦巻形式で、含じん気流は接線方向から集じん塔に入りらせん気流となって塔内を上昇する。高電圧電源には、150 kV-6 mA の負の極性をもつ小型電源で、西独メーカー製（AGLA 社）の装置を用いた。放電端子は、1 列 20 mm 間隔に 100 本取り付け、直交配列で 4 列計 400 本からなる針状放電端子である。針状粒子の材質は 1.5 mm ϕ のピアノ線、中心軸は 3/8 inch のステンレス鋼管を使用した。

粉体試料は、フライアッシュ（関西電力製）をフルイ

Fig. 1 実験装置フローシート

昭和50年1月11日受理

* 昭和49年4月化学工学協会第39年会（東京）において一部発表

** 同志社大学工学部化学工学科

（〒602 京都市上京区烏丸今出川東入ル）

TEL 075-211-2311

Fig. 2 集じん装置本体略図

分けし、 37μ のフルイ目を通したものを 80°C 恒温槽で24時間乾燥させ、さらに風篩法によって粒子径をそろえて、再び同様に乾燥させたものを用いた。平均粒子径 $D_{p50}=4.0\mu$ （重量基準平均）、標準偏差 $\sigma_g=1.7$ 、粒子密度 $\rho_p=2.27\text{g/cm}^3$ であった。また、粒子径の測定は顕微鏡写真法により、定方向径による個数分布を測定して求めた。凝集粒子のサンプリングは集じん極板上の13点で行ない、1つのサンプリング点で2000個以上の粒子数を数えた。凝集粒子が球形に近いので、この測定法は妥当であると考えられる。

実験条件は、印加電圧 $0\sim 120\text{kV}$ 、電極間距離 228mm 、塔内平均温度 $12.5\sim 17.0^\circ\text{C}$ において、空気流量 $10.55\text{m}^3/\text{min}$ 、含じん濃度 $1.8\sim 14.0\text{g/m}^3$ であり、塔内湿度は $0.010\sim 0.012\text{kg-H}_2\text{O/kg}$ 乾燥空気の範囲内である。

3. 実験結果および考察

集じん極に捕集された粉体の顕微鏡写真を Fig. 4 に示した。これによると、滞留時間が長くなるほど粒子が凝集を起こし、粒子径が増大していることが観察される。前報で述べたように、種々の予備実験の結果、この凝集現象がただ単に機械的な作用力によるものではなくコロナ放電による静電気作用力によるものであることが分っており、このような凝集を静電凝集と定義した。特に高電圧の場合、印加電圧が高いほど、また、含じん濃度が大きいほど、この凝集現象が顕著に見られた。

使用した高電圧電源の電圧-電流特性は、Fig. 3 のよ

Fig. 3 高電圧電源の電圧-電流特性

Fig. 4 集じん極に捕集された粒子の顕微鏡写真

うであった。この特性は、含じん濃度、気体湿度、放電間距離などのコロナ放電場の条件によって変化するものである。前述した実験条件のもとで、凝集粒子径を顕微鏡写真法によって測定し、また、集じんされた粉体の重量測定を行なった。

Fig. 5 に、印加電圧 120kV 、入口含じん濃度 14g/m^3 の場合の集じん塔を上昇するに伴う粒度分布の経時変化を示した。2.2秒後には、微粉が減少して粗粉側に分布が広がっている。Fig. 6 には、印加電圧をパラメータとして、入口含じん濃度 8.3g/m^3 の場合の凝集粒子径と滞留時間の関係を示した。また、Fig. 7 には、印加電圧 120kV の場合含じん濃度をパラメータとして凝集粒子径と滞留時間との関係を示した。Fig. 6 において、含じん濃度が一定の場合、印加電圧が 58kV 、 78kV では時間の経過とともに、凝集平均粒子径は一定の

Fig. 5 粒度分布の経時変化
印加電圧 $V=120$ [kV], 含じん濃度 $\gamma=14$ [g/m³]
の場合

Fig. 6 印加電圧の影響
含じん濃度 $\gamma=8.3$ [g/m³]

Fig. 7 含じん濃度の影響
印加電圧 $V=120$ [kV]

値に近づき、120 kV の場合でも Fig. 7 のように含じん濃度が高くなるとともに、凝集平均粒子径は一定の値に近づいている。これらのことから、高電圧を印加電圧として用いた場合、この静電凝集現象は印加電圧が高いほど、含じん濃度が高いほど顕著に観察され、さらに、凝集粒子径はむやみに大きくなるのではなく、ある平衡値があることが明らかとなった。この平衡となる粒子径は、印加電圧が 58kV, 78kV の場合には Fig. 6 からまた、120kV の場合には Fig. 7 から、97.5kV の場合も同様の図よりその値を推定すると、Fig. 8 のよう

Fig. 8 平衡粒子径と印加電圧

に、平衡粒子径と印加電圧との関係が求まった。これによると、平衡粒子径は、放電開始電圧 26kV 付近から印加電圧の増加とともに増大し、120kV 以上では、平衡粒子径も一定値に近づいている。前報²⁾では、この静電凝集に参与する作用力として、帯電粒子の静電効果による分極によって誘起される双極子モーメント作用力とクーロン作用力とのバランスから、平衡となる粒子径が存在することを算定したが、Fig. 8 でもその傾向が確かめられた。

つぎに、粒子個数濃度の時間的変化から、凝集速度について考えてみる。荷電粒子のように、粒子間に静電気作用力のような外力が働く場合、粒子間の力を $F(r)$ とすると、単位時間に半径 r の球殻を通る粒子数 P は、

$$P = \int_{D_{p0}}^{\infty} \frac{4\pi D n_0}{r^2} \exp\left[-\frac{\Psi(r)}{kT}\right] dr \quad \dots\dots(1)$$

$$\Psi(r) = \int_r^{\infty} F(r) dr \quad \dots\dots(2)$$

で求まる³⁾。ここで、 D : 拡散係数、 k : ボルツマン定数、 T : 温度、 D_{p0} : 最初の粒子径である。この式中で、 $\Psi(r)=0$ 、あるいは $\Psi(r)=\text{一定}$ とすると、Smoluchowski の式となる⁴⁾。すなわち、 $P=-(dn/dt)$ として、

$$-\frac{dn}{dt} = k_0 n^2, \quad \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = k_0 t \quad \dots\dots(3)$$

で示される。ここで、 n_0 : 初期粒子個数濃度、 n : 時間 t における粒子個数濃度である。また、乱流場における凝集についても、その作用力がいくつかあるが、一般には衝突粒子数は、

$$P = k_T n^2 \quad \dots\dots(4)$$

Fig. 9 通過率の経時変化

で与えられる⁵⁾。ここで、 K_T は乱流場の条件によって決まる凝集速度定数である。このような種々の力が粒子に加わって凝集が起きるわけであり、それぞれの作用力による凝集が同時に起こる場合、衝突確率は加算性が成り立ち、したがって、凝集速度定数もそれぞれの和として得られるとすると、(3)式、(4)式の形から

$$-\frac{dn}{dt} = \xi n^2 \quad \dots\dots(5)$$

と表現できる。本実験条件では、凝集による粒子個数濃度の減少と、さらに、集じん極への粒子捕集による粒子個数濃度の減少を考えて、基礎式として、

$$-\frac{dn}{dt} = \xi n^2 + \frac{d\eta(t)}{dt} \quad \dots\dots(6)$$

を考える。ここで、 ξ ：凝集速度定数、 $\eta(t)$ ：捕集粒子個数濃度である。 $\eta(t)$ は Deutsch の式から、つぎの

式で示される。

$$\eta(t) = n_0 \{1 - \exp(-\phi t)\} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 ϕ は定数である。なお、(6)式は非線形の方程式となるので、Picard の逐次近似法を用いて数値計算を行なった。初期条件 $t = 0, n = n_0$ 時間 $t < 1$ sec の範囲で解を求めた。(7)式において、 ϕ は Fig. 9 に示される粉じんの通過率より値を求めた。印加電圧 120kV、含じん濃度 3.1×10^7 個/cm³ の場合、(6)式より凝集速度定数 ξ を計算すると、 2.1×10^{-4} cm³/sec と求まった。この値は概算ではあるが、Smoluchowski らのブラウン運動による場合の 10^6 倍、高橋の成書⁵⁾の乱流場の値の 10^3 倍の値を示している。したがって、本実験の場合には、 ξ は静電凝集によるものが支配的であると考えられ静電凝集速度は、ほかの作用力による凝集と比較して非常に速いことが分った。

4. 結 言

高電圧を用いた電気集じん装置において、微粉体は静電凝集を起こし、その静電凝集速度定数はかなり大きいことが概算された。

凝集速度定数の理論的取扱いについては、(1)式のモデルが妥当であるのかどうか、今後さらに種々の条件について実験による検討を加えてゆくつもりである。その場合、凝集と分散との動的バランスを考慮する必要があると思われる。

本研究において、高電圧発生装置はじめ、実験装置製作にあたってご援助いただいた日本臓器製薬(株)に深甚の謝意を表する。

記 号

D : 拡散係数	[cm ² /sec]
D_p : 粒子径	[μ]
$\bar{D}_p$: 平均粒子径	[μ]
D_{p50} : 積算率50%になる粒子径	[μ]
$\bar{D}_{p\infty}$: 平衡粒子径	[μ]
I : 放電電流	[mA]
K_0 : Smoluchowskiの式における凝集速度定数	[cm ³ /sec]
K_T : 乱流場の凝集速度定数	[cm ³ /sec]
k : ボルツマン定数	[erg/°K]
n : 粒子個数濃度	[1/cm ³]
n_0 : 初期粒子個数濃度	[1/cm ³]

P : 通過粒子数	[1/sec]
r : 粒子通過半径	[cm]
T : 絶対温度	[°K]
t : 滞留時間	[sec]
V : 印加電圧	[kV]
γ : 含じん濃度	[g/m ³]
η : 捕集粒子個数濃度	[1/cm ³]
ξ : 凝集速度定数	[cm ³ /sec]
ϕ : 装置定数	[1/sec]
Ψ : (2)式によって定義された関数	

引用文献

- 1) Flossmann R., Schütz A. : *Staub*, **23**, 443 (1963)
- 2) 奥田聡, 高野頌ほか : 化学工学協会第39年会講演要旨集 (1974)
- 3) Fuchs, N.A. : *Mechanics of Aerosols*, 305, Pergamon Pres (1964)
- 4) von Smoluchowski, M. : *Z. Phy. Chem.*, **92**, 129 (1917)
- 5) 高橋幹二 : 基礎エロゾル工学, 養賢堂 (1972)

Author's Abstract

Electrostatic Agglomeration of Fine Particles in the Electrostatic Precipitator

by

Satoshi OKUDA, Hiroshi TAKANO, Masaaki MURAKAMI

(Department of Chemical Enginnering, Doshisha University)

This paper was dealt with the characteristics of fine particles in the electric field with corona discharge. The experimental apparatus Was consisted with the needle type electrodes and cylindrical type collecting tower. The generator has rather high voltage up to 120kV, and dusty gas was induced tangentially into the bottom of the tower. The measurements distribution at each vertical section of the tower were carried out to observe the agglomeration phenomena. From these measurements the agglomeration velocity was assumed.

List of figures

- Fig. 1 : Schematic representation of apparatus
- Fig. 2 : Crossectional view of electrostatic precipitator
- Fig. 3 : Characteristic diagram of high voltage generator between V and I
- Fig. 4 : Photograph of agglomerated particles on the collecting plate
- Fig. 5 : Change of particle distribution with the

passage of time

- Fig. 6 : Relation between $\overline{D}_p$ and t —the effect of applied voltage
- Fig. 7 : Relation between $\overline{D}_p$ and t —the effect of particle concentration
- Fig. 8 : Relation between applied voltage and equilibrium particle diameter
- Fig. 9 : Uncollected percentage with the passage of time