

II-129 トレーサーを利用した用廃水処理に関する研究

フロック凝集理論への考察

京都大学工学部 正員 岩井重久

京都大学工学部 正員 井上頼輝

○ 京都大学原子炉 正員 工藤 章

1. 緒言

薬品混和凝集沈殿処理において、急速攪拌終了後、緩速混和池へと流入して来る微小粒子群は、池内での (1) ブラウン運動にもとづく拡散衝突合一、(2) 水の速度差にもとづく衝突合一、(3) 乱流拡散にもとづく衝突合一、等々によって大粒子へと成長し、固液分離の沈殿池へと運ばれて行く。薬品注入急速攪拌池の過程で、多価金属イオンが水解度の小さい水酸化物を生成し、無機水酸化物の重合体を生成して固型化する現象については、無機構造化学、界面化学、電気化学等々の方向から多くの研究がなされているが、まだ不確実な点が多く、今後の研究が期待されている。

一方、緩速混和池内へと流入した微小粒子群（直径 $10^3 \mu$ の order）が衝突合一して大粒子化する集合凝集（Flocculation）現象については、同じく流体である空気中でのエアロゾルの凝集現象と同じように、諸家による多くの研究がなされて来ている。

本研究では、分子衝突理論の概念から、凝集を表わす基本式として

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \underbrace{\text{div}(D \text{grad} n)}_{\text{拡散の項}} - \underbrace{\text{grad}(Vn)}_{\text{輸送の項}} - \underbrace{k n^2}_{\text{凝集の項}} \dots \dots \dots (1)$$

を提案し、凝集定数 k についての検討を行なった。ここで、 n ：単位体積中の粒子個数、 t ：時間、である。そして、凝集定数 k は、粒子に与えられたエネルギー（すなわち凝集エネルギー E ）によって決定される考えた。また、薬品混和凝集沈殿処理で利用される緩速混和池でのフロック粒子の体積は、緩速混和池で、フロックの沈降を考えたため、一定であり、このためフロック粒の直径とフロック粒子数との間に連続の式を導入した。

2. 従来の研究

凝集理論については多くの研究が18世紀後半から行なわれ、多数の仮説が提案されている。M.V. SMOLUCHOWSKI は1918年これらの諸説を批判した後、凝集の原動力としてブラウン運動を取り上げ、電荷放出後の粒子の衝突の機会、ブラウン運動により粒子相互間の距離が、ある一定限度以内になる時に起ると考え、ブラウン運動にもとづく拡散係数を

$$D = \frac{RT}{N_{Av}} \cdot \frac{1}{6\pi\mu D_p}$$

と表現し、凝集による粒子減少の式として

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -k n^2$$

を得ている。ここで、 R ：気体定数、 T ：絶対温度、 N_{Av} ：アボガドロ数、 μ ：媒体の分子粘性係数、 D_p ：粒子径、 n ：単位体積中の粒子数、 t ：時間、 k ：凝集定数、である。

その後、凝集の問題はコロイド学およびエアロゾル研究の分野で取り扱われ、1953年、T.R. Camp が薬品混和凝集処理について、様速混和池内での水流り速度勾配によるフロック粒子の衝突から、G-value 説、GT-value 説を導入し、さらに、E.L. Bean (1953年) の混和係数説、我国では、合田博士の乱流拡散にもとづく衝突合一说、最近では、北大丹保氏の乱流変動にもとづく衝突合一说等が提案されている。

3. 凝集理論への考察

本研究では、ここに述べたように凝集を起す推進力として、粒子に与えられる運動エネルギー E_{ki} を考えた。これは外から機械的な攪拌によって媒体に変動速度を起こせ、粒子と媒体との密度差により、媒体より粒子に相対的に多くの運動エネルギーを与える外力運動エネルギー E_{out} と、粒子にブラウン運動を起こせる媒質の分子運動エネルギー E_{Brown} とが考えられる。これを式で表わると次のようになる。

$$E_{ki} = E_{out} + E_{Brown} = \frac{\pi}{12} (\rho_p - \rho_f) \bar{v}^2 D_p^3 + \frac{3}{2} BT$$

ここで、 ρ_p, ρ_f : 粒子、媒体の密度、 $\bar{v}^2$: 媒体変動速度、 B : ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/c}$),

一方、粒子が凝集するためには凝集推進エネルギー E_{ki} が越えなければならない粒子相互作用ポテンシャルエネルギー E_{sa} がある。これは粒子表面電荷によるクーロン反力の積分ポテンシャルエネルギー E_{ei} およびファンデルワールス引力の積分されたポテンシャルの合成されたエネルギー E_{en} の和であり、次式で表される。

$$E_{sa} = E_{ei} + E_{en} = \frac{1}{4} D_p \cdot d \Phi_s^2 \ln(1 + \exp(-kl)) - \frac{Av}{6} \left(\frac{D_p^2}{2(l^2 + 2D_p l)} + \frac{D_p^2}{2(l + D_p)^2} + \ln \frac{l^2 + 2D_p l}{(l + D_p)^2} \right)$$

ここで、 Av : ファンデルワールス定数 (10^{-12} erg), l : 粒子間距離

さらに薬品混和凝集処理の様速混和池で忘れてならないことは、フロック粒子の分裂作用である。本研究では、フロック粒子が一粒として結合しているポテンシャルエネルギー E_{st} と分裂推進エネルギー E_{kn} が越えた時に分裂が起るとすれば、分裂エネルギー E_{kn} は次式で表される。

$$E_{kn} = E_{kn} - E_{st} = d D_p^4 - E_{st} \quad d = \frac{3}{4} \pi^2 \mu v^{\frac{1}{2}} \frac{1}{D_p} \left| \left(\frac{1}{2} \right)^2 - \left(\frac{1}{D_p} \right)^2 \right| d \left(\frac{1}{D_p} \right)$$

ここで、 E_{st} : 粒子の堅牢さを示す結合エネルギーで、フロックの性質により、変化するものと考えられる。

4. 結論

以上の考察により凝集エネルギー E_{ek} は次式で表わされる。

$$E_{ek} = E_{ki} - E_{sa} - E_{kn}$$

これは定性的に図-1によって示される。このことは、フロックの凝集で扱う粒径 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ cm}$ の範囲では(1)式の長は $l = K D_p^2$ で表され、様速混和池内でのフロックの体積は一定であるので連続式 ($n \cdot \frac{\pi}{6} d_p^3 = \text{const.}$) を用いると、(1)式は次のようになる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} n) - \text{grad}(vn) - Kn$$

以上の詳細は講演時に発表する。

