

八戸工業大学 正会員 福士 寛一, 北海道大学 正会員 丹保 寛仁

1. はじめに

本報では、流入フロック群と気泡群が混合接触するゾーンにおいて、気泡が時間経過と共にどのように付着してゆくかという動力学の問題を扱う。連続式加圧浮上分離槽は、図-1のように模式化でき、ある粒径分布を持ったフロック群が混合接触ゾーンにおいて乱流混合により気泡群を接触付着し、一定時間後に浮上分離ゾーンへ移行して分離されると考える。したがって、混合接触ゾーンにおいて、気泡が任意個付着したフロック個数の経時変化を求め、これを上昇速度分布に変換し、浮上槽の表面負荷率を与えて除去率に結びつけば設計が行なえる。

2. 気泡とフロックの付着の動力学式

(1) 仮定条件として、①気泡数 na と気泡径 da 一定、②気泡とフロックの衝突径は付着気泡数 i によらず不変、③気泡同士、フロック同士の衝突は考慮しない、

④付着した気泡は脱着しない、⑤フロック径 df に固有の最大付着気泡数 m が存在する。

として、Levichの式を応用すると、あるフロック径 df に関して、

$$\frac{dN_{f,i}}{dt} = 12\pi\beta\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \left(\frac{df+da}{2}\right)^3 \alpha_{f,i-1} \cdot na \cdot n_{f,i-1} - 12\pi\beta\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \left(\frac{df+da}{2}\right)^3 \alpha_{f,i} \cdot na \cdot n_{f,i} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_{f,i}}{dt} &= \frac{3}{2}\pi\beta\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \cdot na \cdot da^3 \left(1 + \frac{df}{da}\right)^3 (\alpha_{f,i-1} n_{f,i-1} - \alpha_{f,i} n_{f,i}), \quad (i=1 \sim m) \\ \therefore \frac{dN_{f,0}}{dt} &= \frac{3}{2}\pi\beta\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \cdot na \cdot da^3 \left(1 + \frac{df}{da}\right)^3 (-\alpha_{f,0} \cdot n_{f,0}), \quad (i=0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^m N_{f,i} = N_{f,0} \quad (t=0)$$

ここで、 $N_{f,i}$: i 個の気泡が付着したフロックの個数濃度 ($1/cm^3$)、 ϵ_0 : 有効エネルギー逸散率 ($erg/cm^3 \cdot sec$)

μ : 粘性係数 ($g/cm \cdot sec$)、 β : 比例定数 $= 1/\sqrt{15}$ (-)、 df, da : それぞれフロックと気泡の径 (cm),

$\alpha_{f,i}$: i 個の気泡が付着したフロックと気泡の衝突合一係数 (-)、 na : 気泡個数濃度 ($1/cm^3$)、 t : 接触時間 (sec)

(2) 最大付着気泡数 m -----筆者らは、別の実験により気泡が負に強く荷電していることを確かめており、気泡が付着できるのは、フロック表面のうちの正荷電のアルミニウム種の存在している部分である。この部分のフロック表面に対する割合を $Cove$ (-) とすると、気泡が付着しうるフロック上の面積は、 $\pi df^2 \cdot Cove$ となる。一個の気泡が占める面積を気泡径を一边とする正方形領域 da^2 とすると、最大付着気泡数 m (-) は、

$$m = \frac{\pi df^2 \cdot Cove}{da^2} = Cove \cdot \pi \cdot \left(\frac{df}{da}\right)^2 \quad \text{となる。} \quad (3)$$

(3) 衝突合一係数 $\alpha_{f,i}$ ----- 最大付着気泡数が m である場合、これに至る中途過程では付着しうる余地にその場合の衝突合一確率が比例すると考えられる。したがって、次式のように $\alpha_{f,i}$ を示すことができる。

$$\alpha_{f,i} = \alpha_{f,0} \left(1 - \frac{i}{m}\right) \quad \text{ここで } \alpha_{f,0}; \text{ 初期合一係数で } \alpha_{f,0} \equiv Cove \text{ と考えられる。} \quad (4)$$

(4) 数値計算 ----- 無次元時間 $T = \frac{3}{2}\pi\beta\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu}} \cdot da^3 \cdot na \cdot t$ 、無次元フロック径 $F = \frac{df}{da}$ 、 $N_{f,i} = \frac{N_{f,i}}{N_{f,0}} \quad (t=0)$ として、式 2, 3, 4 を変形し無次元化すると、以下になる。 $(\alpha_{f,0} = \alpha_0, i=I, m=M \text{ と表示する})$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_{f,I}}{dT} &= \alpha_0 \cdot \frac{(F+1)^3}{M} \cdot \{(M-I+1) \cdot N_{f,I-1} - (M-I) \cdot N_{f,I}\}, \quad (I=1 \sim M) \\ \frac{dN_{f,0}}{dT} &= \alpha_0 \cdot \frac{(F+1)^3}{M} \cdot (-M \cdot N_{f,0}) \quad (I=0), \quad M = \pi \cdot \alpha_0 \cdot F^2 \cdot \sum_{i=0}^M N_{f,i} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式5は、 F, α_0 によるが最大500元程度の連立常微分方程式であり、計算はルンゲクッタ・ギル法で行なった。 $\alpha_0 = 0.1 \sim 0.5$ について、 $F = 1 \sim 17$ の各々の解 (T と N_{FI} の関係) を求めた。計算条件は、水温 15°C , $\epsilon_0 = 0.06 (\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec})$, $da = 0.00628 (\text{cm})$, $na = 58,400 (1/\text{cm}^2)$ とした。 na は、後述の実験条件 (加圧 $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 循環比10%) の理論析出空気量より計算したが、別の実験から約 $50,000 \sim 60,000 (1/\text{cm}^2)$ と実測されている。計算結果の一例を図-2に示す。

(5) 上昇速度分布のシミュレーション——式5の解は、任意の接触時間 T での気泡が I 個付着した径 F のフロックの存在比として求まる。したがって、別報の式12に、 $F = \frac{df}{da}$, $I = i$ として代入し、さらに、実際の流入フロック群の粒径分布 $f(F)$ を導入すれば、接触時間 T 後の気泡-フロック集塊物の上昇速度分布をシミュレーションできる。図-4に結果の一例を示す。なお、フロック粒径分布は別報の図-4のものを使用した。図-3は、上昇速度の平均値に及ぼす α_0 と T の影響をシミュレーションした結果で、接触時間が $T = 1.0$ 程度であることを示す。

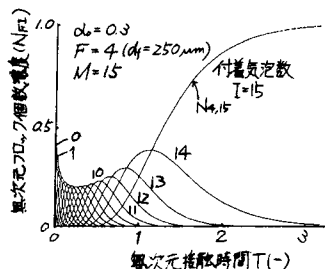


図2 気泡付着過程のシミュレーション

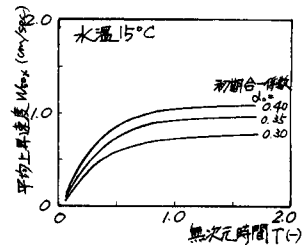


図3 パラメータの影響

3. 実験結果との比較と考察

初期合一係数 α_0 の推算と、無次元時間 T の検討をかねて、上記の数値計算条件と同一条件で実験を行った。装置は別報の図-1と同様であり、浮上槽で凝集・フロック形成後 (試料水 750 ml), そのまま緩速攪拌を続けながら気泡を導入・接触させ (浮上槽を混合接触ゾーンとみなした。), 測定セル内に吸引して上昇速度、フロック径などを測定した。実験は、接触時間 $t = 5 \text{ sec}$, 10 sec の2シリーズ行った。上昇速度分布の測定結果、 $\alpha_0 = 0.35$ で比較的一致した。さらに、前報の図6に示したように任意の α_0 , T の組合わせにおいて、フロック径毎に上昇速度の下限と上限を計算し、実測値と対比させ、 α を推定することもできる。 $\alpha_0 = 0.35$ で一致した。

無次元時間 T は、 $T = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{da}} \cdot na \cdot t$ で示され、上記の実験条件では、 $T = 4.0 \times 10^{-2} t_{\text{sec}}$ の関係となる。ここで有効エネルギー逸散率 ϵ_0 は、 $0.06 (\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec})$ と推定して計算した。丹保らによって、 ϵ_0 とフロックの最大成長径の関係が求められており²⁾、本研究でのフロック最大径は約 0.1 cm であったことから本実験の凝集条件 (ALT比 0.05 , $\text{pH } 7.25$) では、 $\epsilon_0 = 0.06 (\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec})$ と推定される。以上の結果より、別報の結果とあわせ、1) 加圧浮上分離の乱流混合ゾーンにおいて、フロックに微気泡が付着していく過程の動力学式を提案し、シミュレーションを行い、2) これと、提案した気泡-フロック集塊物の浮上速度式を用いて浮上分離速度に結果を変換し、気泡導入条件とフロック径分布を知って浮上分離の効果を理論的に評価する方法の基礎を確立できた。ちなみに、図-5に同一実験条件で求めた沈降速度分布を示すが、図-4と比較すれば、浮上分離速度が一桁速いことがわかる。

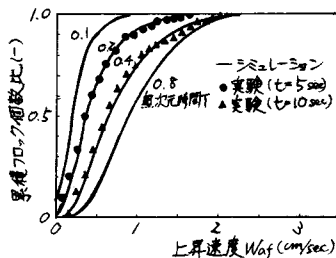


図4 上昇速度分布のシミュレーション

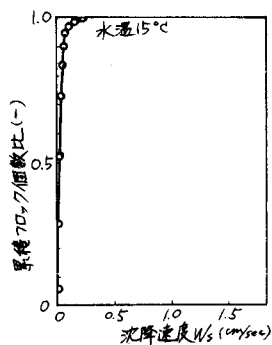


図5 沈降速度分布

<参考文献> 1) 丹保・福士: 加圧浮上分離の動力学(Ⅱ), 土木学会第39回年講

2) Tambo, Watanabe: Physical Aspect of Flocculation Process - I. Fundamental Treatise, Water Research, Vol. 13, p. 433.