

1. はじめに

Eckenfelder¹⁾が提唱した気-固比(式-1)は、活性汚泥等の高濃度懸濁質の浮上分離における重要な操作・設計因子として用いられてきた。筆者の実験結果²⁾からもこのことが確認されており、図-1, 2に示すように浮上汚泥濃度、処理水SS、浮上速度はこれによりある程度評価しうる。しかし、式-1による定義のみでは気-固比は単位懸濁質量当りいくらの空気量を析出させたかという半定量的な意味しか持ちえず、その理論的意義や適用しうる懸濁質濃度の範囲などについては未解明のままである。そこで、すでに提案したフロック群への気泡付着過程を記述する動力学式³⁾に基づき、気-固比の持つ意義を理論的に考察してみることとする。

$$A_s = \frac{\Delta p \cdot a_m \cdot r}{S_m} \quad \text{----- (1)}$$

A_s : 気-固比 (-)

Δp : 加圧力差 (kgf/cm²)

r : 循環加圧水量比 (-)

a_m : 単位圧力差当りの析出空気量 (mg/l / kgf/cm²)

S_m : 原水の懸濁質濃度 (mg/l)

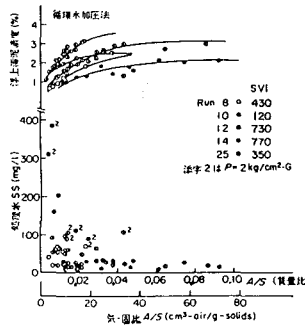


図-1 気-固比による浮上結果の評価

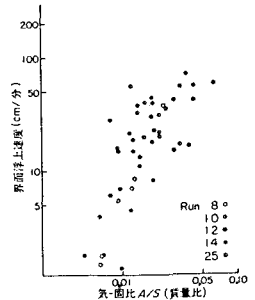


図-2 界面浮上速度

2. 気泡の付着過程を記述する動力学式³⁾

加圧浮上槽の混合接触部で、フロックに気泡が付着してゆく過程を記述する動力学式は、付着の進行に伴って生ずる液本体中の気泡数の減少、及びこれに対するフロック径分布の影響を考慮すると次式のようにになる。

$$N_{F,i} = \frac{C_i}{m_F} \cdot e^{-(1+F)^3 \theta} \cdot [e^{(1+F)^3 \theta / m_F} - 1]^i \quad \text{----- (2)}$$

when $i=0 \sim m_F$

$$\bar{F} = m_F [1 - e^{-(1+F)^3 \theta / m_F}] \quad \text{----- (3)}$$

$$\theta = (1 - \gamma_s) \left[\tau^* + \frac{m_s}{(1+S)^3 (1-\gamma_s)} \log_e \left| \frac{1 - \gamma_s \exp \{ (1+S)^3 (\gamma_s - 1) \tau^* / n_{f0} \}}{1 - \gamma_s} \right| \right] \quad \text{----- (4)}$$

, ($\gamma_s \neq 1$)

$$\theta = -\frac{m_s}{(1+S)^3} \log_e \left[\frac{(1+S)^3}{m_s} \tau^* + 1 \right] \quad \text{----- (5)}$$

, ($\gamma_s = 1$)

$$\tau^* = \frac{3}{2} \pi \beta \sqrt{\epsilon_0 / \mu} n_{a0} d_a^3 \alpha_0 \quad \text{----- (6)}$$

$\gamma_s = (n_{f0} / n_{a0}) m_s$

γ_s は析出気泡量に対する径Sのフロックへ付着する最大気泡量の比を示す無次元数であり最大気泡減少率と名付ける。

上式群のうちで最も重要なパラメータは、気泡付着の進行度を規定する線形の無次元接触時間 τ^* と気泡数の減少度を規定する最大気泡減少率 γ_s である。この2つの値が操作条件により決定されれば、式-4によって非線形の無次元時間 θ が決まり、式-2または式-3により任意の径のフロックへの付着気泡数が求められるからである。なお、一般に、 τ^* が大きいかつ γ_s が小さいほど、気泡付着数が大となりフロックの浮上性が増す。

3. 無次元接触時間 τ^* 、最大気泡減少率 γ_s と気-固比 A_s の関係

無次元接触時間 τ^* 、最大気泡減少率 γ_s を気-固比 A_s により表現して整理すると式-7、式-8のようになる。

$$S = \sqrt{\bar{F}^2} : \text{フロック群の自乗平均径, } \bar{F}^2 = \int_0^\infty F^2 f(F) dF$$

$f(F)$: フロック径分布密度

(気泡径基準の無次元フロック径) $F = d_f / d_a$

(気泡がi個付着した無次元径Fの

フロックの無次元個数濃度) $N_{F,i} = n_{F,i} / n_F$

(無次元気泡個数濃度 or 残存率) $N_a = n_a / n_{a0}$

(径Fのフロックへの最大付着気泡数) $n_F = \pi \alpha_0 F^2$

ここで、 n_F : 径 d_f のフロックの個数濃度 (cm⁻³)

n_{f0} : フロックの総個数濃度で $n_{f0} = \sum n_F$ (cm⁻³)

n_{a0} : 初期(析出時)気泡個数濃度 (cm⁻³), $n_a = n_{a0}$

β : 定数 (-), $1/\beta$ at $t=0$

ϵ_0 : 混合接触部の有効エネルギー消散率 (erg/cm³sec)

μ : 水の粘性係数 (g/cm³sec)

d_f, d_a : それぞれ、フロック径、気泡径 (cm)

t : 混合接触時間 (sec) α_0 : 初期衝突係数 (-)

$$\gamma_s = \frac{\rho_a(\rho_p - \rho_w)m_s}{\rho_{p,ad} \cdot k_p \cdot \int_0^F F^3 - k_p f(F)} \cdot \frac{1}{A_s} \quad \text{---- (7)}$$

$$T^* = 98\sqrt{\epsilon_0/\mu} \alpha_0 t \Delta p a_v \cdot \frac{A_s S_m}{A_s S_m + \Delta p a_v \rho_a \times 10^6} \quad \text{---- (8)}$$

α, k_p : フロック凝集係数の定数, ρ_a, ρ_w, ρ_p : 各々、空気、水、粒子の密度 (g/cm^3)

式-7より、流入フロック群の特性が一定の条件下では、 γ_s は気-固比のみにより定まり、これに逆比例する。すなわち、気-固比を大きくし、懸濁質濃度に比してより大量の気泡を析出させるほど、気泡付着の進行に伴って生ずる気泡濃度の減少を抑制することができ、気泡付着の達成度が高くなる。これに対し、気泡付着の進行を支配する T^* は、式-8より気-固比のみでは表現できず、気-固比と懸濁質濃度の積 $A_s \cdot S_m$ (の n_{a0}) により支配される。すなわち、気-固比のみによって気泡付着の現象の進行を評価することはできず、あくまでも初期析出気泡個数濃度 n_{a0} の大小が気泡付着の進行を左右する。

図-3は、典型的な径分布と密度を持つフロック群に対して典型的な浮上操作条件を加えた場合の T^* 、 γ_s と気-固比の関係を式-7, 8を用いて計算した結果である。低濃度と高濃度懸濁質系の気泡付着過程の動力学的差異を考えながら、気-固比の持つ意味を理論的に考察すると次のようになる。

① 気-固比が高いほど最大気泡減少率 γ_s は小となり、気泡付着に有利な条件となる。ただし、気-固比が0.1程度以上の高い領域では γ_s 値は常に小さく、気-固比の増加に伴う γ_s 値の変化率が小さい。気-固比は0.1程度以下の低い値の領域においてのみ γ_s と鋭敏な対応関係にある。

② 無次元接触時間 T^* は、気-固比が高く懸濁質濃度が高いほど大きな値となり、気泡付着の達成度が高い。また、懸濁質濃度が高いほど気-固比と T^* 値は鋭敏な対応関係にある。

③ 図の左縦軸の循環加圧水量比との関係から、高濃度懸濁系に対し高い気-固比を設定し γ_s 値を低下させ、かつ高い T^* 値を実現させるには、極めて高い循環加圧水量比が必要である。

循環加圧水量比を増すことは直ちに浮上槽の容積を増すことにつながり、この制約から設定しうる気-固比には限界がある。5,000mg/l程度以上の高濃度懸濁系の場合、気-固比は 10^{-2} のオーダーの値しか採用しえない。 10^{-2} のオーダーの気-固比は γ_s 値、 T^* 値および循環加圧水量比と鋭敏な対応関係にあり、浮上分離の操作条件と処理結果を議論するための重要な因子となりうる。多くの研究結果がこのことを示しており、活性汚泥などの高濃度懸濁質の浮上性は、気-固比が 10^{-2} のオーダーで議論されている。^{1), 2)}

④ これに対し、100mg/l程度以下の希薄懸濁系においては、0.1~0.2の容易に実現しうる循環加圧水量比を設定しさえすれば、極めて小さな γ_s 値と充分な大きさの T^* 値を得ることができ、良好な浮上結果を得ることができる。その場合、気-固比は 10^{-1} のオーダーの高い値となるが(注)、このオーダーの気-固比は γ_s 値や T^* 値および循環加圧水量比と鋭敏な対応関係にはなく、希薄懸濁系において気-固比を議論することは意味がない。

したがって、気-固比は 10^{-2} のオーダーの値で高濃度懸濁系の場合においてのみ意義を持ち、筆者が提案した上記の動力学式中のパラメータである最大気泡減少率 γ_s を直接規定する操作因子であると言える。

(注) 気-固比の値が小さいことは、必ずしも析出空気量が少ないことを意味しない。高濃度懸濁系においては 10^{-2} のオーダーの気-固比でも循環加圧水量比の値は大きく、必要とする析出空気量は多い。逆に、低濃度懸濁系においては、 10^{-1} のオーダーの気-固比でも循環加圧水量比の値は小さく、必要とする析出空気量は少ない。

<参考文献>

1) Eckenfelder; Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes (1958), 2) 橋本, 中保; 下水協会誌 No. 176, 3) 野原, 橋本, 板井; 水協誌, 6105

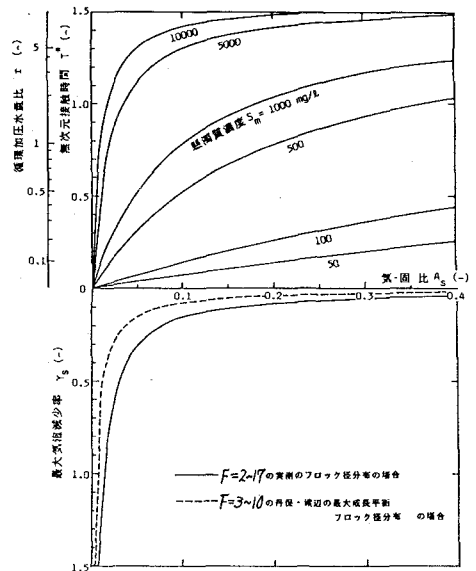


図-3 気-固比と無次元接触時間、最大気泡減少率の関係