

北海道大学 正会員 丹保 憲仁, 八戸工業大学 正会員 福士 憲一

## 1. はじめに

低密度の懸濁粒子やフロック群を処理する場合、効率良く沈殿処理を行うことが難しい場合が少なくない。低温、低濁または低色度の凝集フロック、藻類、金属水酸化物フロック、下水の高次処理の凝集フロックなどが典型で、これらの難沈降性の懸濁成分の処理には加圧浮上分離が有効である。清澄を目的とした加圧浮上分離の研究開発が行われ始めたのは近年であり、英国・北欧での浄水処理に関する成果が主たるものである。研究は実用面のものが多く、プロセス設計の基礎は未確立のままである。筆者らは、加圧浮上分離の清澄処理特性を実験により明らかにしてきたが、<sup>1)</sup>本報ではこの結果を基礎として、加圧浮上分離の動力学的評価を試みることにする。このために、1) 流入フロック群と微細気泡群が混合接触するゾーンにおいて、時間経過と共に気泡とフロックがどのように付着してゆくか、2) その結果、浮上分離ゾーンで気泡-フロック集塊物がどのような速度で上昇してゆくか、の2つの問題を考察し、本報では主として後者について述べることにする。

2. 気泡とフロックそれぞれの諸物性-----気泡-フロック集塊物の上昇速度や密度を論ずるための基礎的数値を得るための実験を行った。図-1の装置を用い、数10倍~200倍に拡大して、気泡径、気泡上昇速度、フロック径、フロック沈降速度などを測定した。実験条件の概要は各図に示してある。

(1) 気泡径、気泡上昇速度-----図-2に気泡径分布を示す。30~100 $\mu$ mの範囲の分布であり、体積平均径は62.8 $\mu$ mである。後述のフロック径分布に比べて分布中が狭く、かつ1桁小さい寸法であるから、代表径として上記の平均径を用いる。上昇速度はストークス領域で考えてよく、気泡内の気体の運動を考え、エマルジョンの沈降速度式である次式を準用する。

$$W_{em} = \frac{g \cdot (S_{em} - S_0) \cdot d^2}{6\mu} \cdot \frac{M + M'}{2M + 3\mu} \quad (\text{Rhybcyn'ski-Hadamard式}) \quad (1)$$

ここで、 $W_{em}$ : エマルジョンの沈降速度 (cm/sec),  $g$ : 重力加速度 (cm/sec<sup>2</sup>)

$S_{em}, S_0$ : エマルジョンと流体の密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $d$ : エマルジョンの直径 (cm)

$M, M'$ : 流体およびエマルジョンの粘性係数 (g/cm·sec)

水中の気泡の場合、 $M' \ll M$ ,  $S_{em} \approx 0$ ,  $S \approx 1$  として、気泡の上昇速度は、

$$W_a = \frac{g \cdot d^2}{12\mu}$$

ここで、 $W_a$ : 気泡上昇速度 (cm/sec),  $d$ : 気泡径 (cm),  $\mu$ : 水の動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/sec)

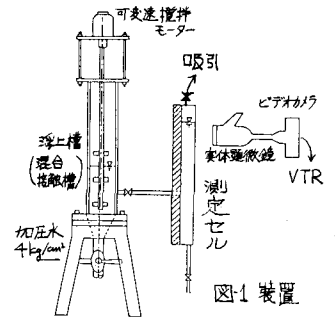


図-1 装置

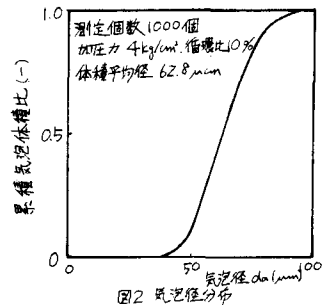


図-2 気泡径分布

図-3に測定結果を示すが、ばらつきはあるものの式(2)と一致している。

(2) フロック径、フロック有効密度-----気泡-フロック集塊物の上昇速度を定めるフロック側の条件としては、フロック粒径分布と有効密度が重要である。図-4に回分式試験のフロック径分布を示すが、100~1,100 $\mu$ mの範囲に分布している。図中には、気泡が付着したフロックの径分布も示してあるが、本実験条件では両者の分布に大差はなく、流入フロック径分布をそのまま浮上時の分布と考えてよい。フロックの密度は粒径の増大と共に低下し、その有効密度は丹保・渡辺のフロック密度関数により次式で与えられる。

$$S_e = a \cdot (df/1)^{-K_S}$$

ここで、 $S_e$ : フロック有効密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $S_f, S_w$ : それぞれフロックと水の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$df$ : フロック径 (cm),  $a, K_S$ : 凝集条件による定数 (g/cm<sup>3</sup>と無次元),  $1$ : 定数 (cm)

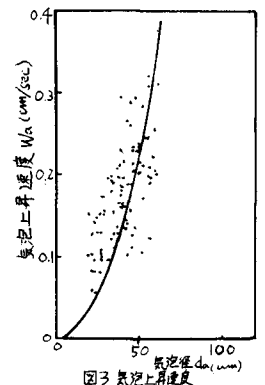


図-3 気泡上昇速度

図-5に密度の測定結果を示す。

$\alpha = 1.88 \times 10^{-4}$ ,  $K_S = 1.21$ である。

### 3. 気泡-フロック集塊物の 有効密度と上昇速度

(1) 気泡-フロック集塊物の浮上  
の際の抵抗係数-----ストークス領域  
と考えてよいので、抵抗係数  $C_D$  は  
次式で示される。

$$C_D = K / Re = K \cdot V / da_f \cdot Waf \quad \text{--- (4)}, \quad da_f = (df^3 + i \cdot da^3)^{1/3} \quad \text{--- (5)}$$

ここで、 $da_f$ : 気泡-フロック集塊物の径(cm),  $i$ : 付着気泡数,  $Waf$ : 気泡-フロック集塊物の上昇速度( $\text{cm/sec}$ )

ここで、抵抗係数中の定数  $K$  が問題となる。気泡の場合、式(2)をストークス式の形で考えて  $K=16$  であり、フロックは正八面体を代表的形状とすると  $K=45$  としてよい。ストークス領域では抵抗が表面積に比例して生ずるので上記の気泡とフロックの  $K$  値を用いて、次式により気泡-フロック集塊物の  $K$  を推算することとする。

$$K = \frac{16i da^2 + 45 df^2}{i da^2 + df^2} \quad \text{--- (6)}$$

(2) 有効密度と上昇速度-----集塊物の体積と重量の収支より、

$$Vaf = Vf + i \cdot Va = \frac{\pi}{6} df^3 + i \cdot \frac{\pi}{6} da^3 \quad \text{--- (7)}$$

$$Saf \cdot Vaf = Sf \cdot Vf + i \cdot Sa \cdot Va \quad \text{--- (8)}$$

ここで、 $Vaf$ : 集塊物の体積( $\text{cm}^3$ ),  $Vf$ ,  $Va$ : フロック部分、気泡部分の体積( $\text{cm}^3$ )  
 $Saf$ : 集塊物の密度( $\text{g/cm}^3$ ),  $Sf$ ,  $Sa$ : フロック、気泡の密度( $\text{g/cm}^3$ )

$$\text{式(7),(8)より、} Saf = \frac{Sf \cdot Vf + i \cdot Sa \cdot Va}{Vaf} = \frac{Sf \cdot df^3 + i \cdot Sa \cdot da^3}{df^3 + i \cdot da^3} \quad \text{--- (9)}$$

これに、式(3)のフロック密度関数を導入すると、集塊物の有効密度は、

$$\therefore Saf - Sw = \frac{\alpha \cdot (df/i)^{-K_S} \cdot (df/da)^3 + i \cdot (Sa - Sw)}{(df/da)^3 + i} \quad \text{--- (10)}$$

となる。集塊物の上昇速度  $Waf$  を示す一般式は、ストークス式より、

$$Waf = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{Sw - Saf}{Sw} \cdot da_f} \quad \text{--- (11)}$$

これに、式(4), (6), (10)を代入すると、ストークス領域での気泡-フロック集塊物の上昇速度式は次式となる。

$$\therefore Waf = \sqrt{\frac{4}{3\mu} \cdot \frac{g}{16i da^2 + 45 df^2} \cdot \frac{\alpha \cdot (df/i)^{-K_S} \cdot (df/da)^3 + i (Sa - Sw)}{(df/da)^3 + i} \cdot da_f^2} \quad \text{--- (12)}$$

( $da_f$ は式(5)による。)

(3) 上昇速度式の検討----- 式(12)中の  $\alpha$ ,  $K_S$ ,  $da$  は、前述のように決定されたので、検討の中心は観察したフロック(径  $df$ )の付着気泡数( $i$ )と、その上昇速度を測定することにある。その結果、付着気泡数が多い場合にその数を正確に読み取れないために、式(12)を直接実験で証明することをやめ、別の方法により考察する。別報<sup>2)</sup>で明らかにするように、気泡とフロックの接触付着の動力学式を導くことにより、ある接触条件における任意のフロックへの付着気泡数の範囲が求められる。これに式(12)を用いれば、任意のフロックの上昇速度の予測値を計算できる。図-6に2本の曲線で示したのが、その上限と下限値であり、実測した  $Waf$  は点で示してある。実測値は、ほぼ、予測値の範囲内にあり、式(12)は、ほぼ妥当なものと考えられる。

<参考文献> 1) 福士; 加圧浮上法による有機性排水の清澄処理特性(II), 土木学会37年講, 2) 福士・丹保; 土木学会39年講。

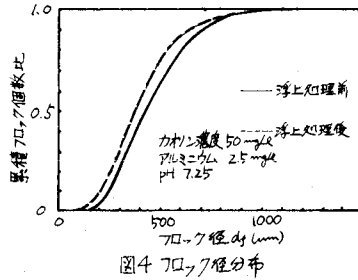


図4 フロック径分布

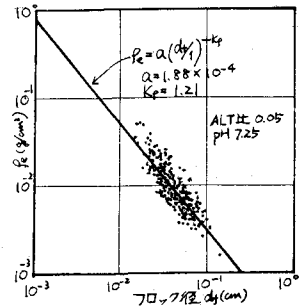


図5 フロック有効密度

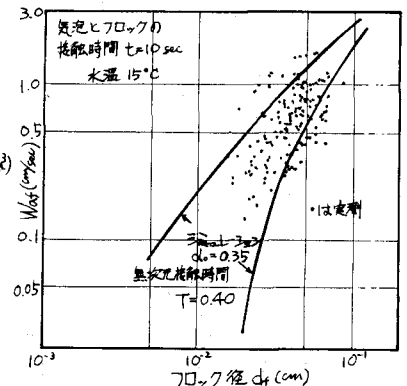


図6 気泡-フロック集塊物の上昇速度