

水理学的攪拌によるフロッキュレーション

宮崎大学工学部 正員 渡辺義公 ○学生員 太田孝樹 学生員 浦上研二

1. はじめに 筆者らは微小粒子の吸合速度を測定しフロッキュレーターの有効エネルギー消費率を定量化する方法を提案し、そのパドル式フロッキュレーターへの適用について報告した¹⁾。本研究では提案された方法を多孔板を通過する噴流による攪拌力を利用したフロッキュレーター(以下、多孔板フロッキュレーターと呼ぶ)に適用して有効エネルギー消費率を算定した結果について報告する。

2. 微小粒子のフロックへの吸合過程の解析¹⁾ 理論展開にあたりフロックへのマイクロフロック集合数を R とし $R=1$ の粒子を微小粒子、最大フロックのマイクロフロック集合数 S と定義する。微小粒子はフロック形成時間に伴い減少するのみであるから筆者らのフロック形成理論よりその減少速度として式-(1)を得る。

$$\frac{dn_i}{dt} = -A \sum_{j=1}^{S-1} \alpha_{ij} (i^{2j} + 1)^3 \cdot n_i n_j \dots \dots \dots (1) \quad A = 1.22 \sqrt{\varepsilon_0} d_i^3$$

ここで、 α_{ij} ; i 倍粒子への付着率、 n_i, n_j ; 微小粒子と i 倍粒子の個数濃度、 K_p ; フロック密度関数の指数。微小粒子のそれよりもはるかに大きなフロックへの吸合速度は式-(1)を簡略化した式-(2)により与えられる。

$$\frac{dn_i}{dt} = -\frac{q}{\sqrt{15}} \sqrt{\varepsilon_0} \cdot P \cdot V_i \cdot n_i \dots \dots \dots (2) \quad P = \sum_{j=1}^{S-1} (\alpha_{ij} \cdot V_j / V_i)$$

ここで、 ε_0 ; 有効エネルギー消費率 ($\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)、 V_i ; i 倍粒子の体積率、 V_f ; 全フロック体積率、 P ; フロック群に対する微小粒子の付着率。

フロック群が成長段階にある場合には P と V_f を時間の関数として定式化できれば式-(2)の積分が可能となる。フロック形成過程の数値解析の結果を利用すると V_f と P は無次元化フロック形成時間 $m \{ 1.22 \sqrt{\varepsilon_0} d_i^3 n_0 t, d_i$; マイクロフロック直径(cm)、 n_0 ; $t=0$ におけるマイクロフロック個数濃度(cc/cc)}と式-(3)、(4)のような関係にある。

$$V_f \propto m^{0.87} \quad ; \quad m \leq m_e \dots \dots \dots (3) \quad P \propto m^{0.87} \quad ; \quad m \leq m_e \dots \dots \dots (4)$$

したがって、 $P \cdot V_f$ は式-(5)のような指数関数で近似できる。

$$P \cdot V_f = K \left(\frac{m}{m_e} \right)^{1/2} \quad ; \quad m \leq m_e \dots \dots \dots (5)$$

m_e はフロック群が最大成長分布に達した時の m であり、この時の V_f と P をそれぞれ V_e, P_e とすると $K = P_e \cdot V_e$ である。そこで、式-(6)が成立する。

$$P \cdot V_f = P_e V_e \left(\frac{m}{m_e} \right)^{1/2} = P_e V_e \left(\frac{t_e}{t} \right)^{1/2} \quad ; \quad m \leq m_e \dots \dots \dots (6)$$

式-(6)を式-(2)に代入して、 $t=0$ で $n_i = n_0$ 、 $t=t$ で $n_i = n_t$ の条件で積分すると式-(7)を得る。

$$\log \frac{n_t}{n_0} = -2.0 \sqrt{\varepsilon_0} \cdot P_e \cdot V_e \cdot t_e \left(\frac{t}{t_e} \right)^{1/2} \quad ; \quad t \leq t_e \dots \dots \dots (7)$$

式-(7)を用いると、マイクロフロックの非定常吸合過程の実験を行い任意時間における未吸合マイクロフロック濃度を測定し ε_0 を計算する事が出来る。 P_e は $1/40 \sim 1/45$ と求められている。 V_e についても渡辺らの実測値から

$V_e = V_0 \cdot S_m^{0.26} \dots \dots \dots (8)$ (ここで、 V_0 ; $t=0$ におけるマイクロフロックの体積率、 S_m ; $(\frac{dn_i}{dt})^2$, d_i と d_{max} はマイクロフロックと最大成長フロックの直径)が知られている。

3. 多孔板フロッキュレーターの有効エネルギー消費率

(1) 実験 装置と実験条件を図-1と表-1に示す。多孔板フロッキュレーターのフローパターンは押し出し流型として近似できる。原水のカオリン濃度は50%と(凝集剤として硫酸アルミニウムを50%添加した($K_p=1.5$)).凝集剤添加後の PH は6.8、水温は12°Cであった。流量は、 6.7 l/min , 4.5 l/min , 3.35 l/min の3通りとした。未吸合マイクロフロック濃度を求めるために多孔板によって区切られた部分より槽内水を不攪乱採水したサンプルを30分間静置沈降させ上澄水の中マイクロフロック濃度を測定した。最大フロック径は流出部からサイフォンでフロック群を接写撮影用セルに導き写真をとりフィルム上のフロックの径を実測して求めた。

(2) 実験結果の解析 実験結果を表-2に示す。図-2が不攪乱採水地点での滞留時間と未吸合マイクロフロック

7 濃度 (各Runの平均値) の関係を式-(7)に従ってプロットしたものである。写真撮影により得られたフロック径を表-3に示す。表-3には $d_1=4\mu$ とした S_m の値も併記してある。 S_m が得られると図-3によつて me の値がわかる。マイクロフロックの直径を 4μ 、個数濃度を $2.2 \times 10^6 (\text{cm}^{-3})$ とすると V_0 は 1.41×10^{-4} となる。(したがって S_m と K_0 が既知ならば式-8によつて Ve を計算できる。 me, Ve がわかると式-(9), (10)によつて ε_0 を計算する事ができる。

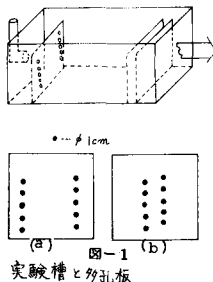


表-1 実験条件と実験装置諸元

実験条件	槽	多孔板	実験回数
濁度 カオリン 50ppm	深さ 34cm	塩ビ製	滞留時間
凝集剤 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 50	幅 28	縦横 28cm	10min
アルカリ剤 NaHCO_3 100	長さ 99.5	1.6枚	15
	水深 24.5	a, b 交互に	20
	(出口)	配管	

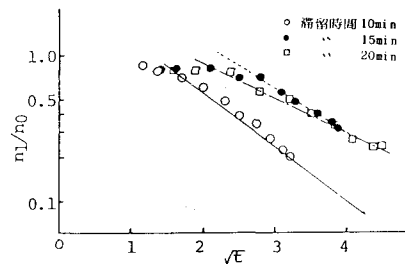


図-2 マイクロフロックの吸着速度

$$me = 1.22 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} d_1^3 n_0 t_e \quad \text{---(9)}$$

$$\frac{\log(n_1/n_0)}{\sqrt{t_e}} = -2.0 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \cdot Pe \cdot Ve \sqrt{t_e} \quad \text{---(10)}$$

式-(10)の左辺の値は図-2の各直線部の勾配である。計算された ε_0 と流入量との関係は図-4である。多孔板フロッキュレーターでは全エネルギー消費率 (ε^*) は式-(11)で与えられる

$$\varepsilon^* = \frac{\rho \cdot Q \cdot h \cdot g}{V \cdot \mu} \quad \text{---(11)}$$

$$h = \alpha \left(\frac{v^2}{2g} \right) = \alpha \left(\frac{Q^2}{A^2} \right) / 2g \quad \text{---(12)}$$

ここで、 ρ ；水の密度 (g/cm^3)、 h ；損失水頭 (cm)、 g ；重力加速度 (980 cm/sec^2)、 V ；槽実容量 (cm³)、 v ；平均流速 (cm/sec)、 A ；槽断面積 (cm²)、 μ ；水の粘性係数 ($\text{g/cm} \cdot \text{sec}$)、 α ；多孔板の特性 (開孔比等) により決まる定数。

パドル式フロッキュレーターでは ε_0 は ε^* の 10% 程度であったので、多孔板フロッキュレーターでも $\varepsilon^* = \eta \varepsilon_0$ (η はエネルギー効率) と仮定すると、式-11 により、 $\varepsilon_0 = \eta \left(\frac{Q^2}{A^2} \right) / Q^3$ となる。

すなわち、 ε_0 は Q の 3 乗に比例する事になり、図-4 は妥当な結果を与えていると考えられる。また、それぞれの Q において推定された ε_0 に対する d_{max} の値もすでに報告された結果とかなり一致しているので、 ε_0 の絶対値も十分に信頼できると考えられる。

4 おわりに 今後乱れのスเปクトルの測定を行い ε_0 を推定し、ここで推定された方法による ε_0 との比較を行って行く予定である。本研究は鹿島学術振興財団の助成金により遂行された事を付記して関係各位に謝意を表す。

参考文献；(1) 渡辺義公、丹保憲仁；フロッキュレーターにおけるマイクロフロックの減少過程の定式化 水道協会誌投稿中

表-2 実験データ

槽	流入	1	2	4	6	8	10	12	14	16	17
L(cm)	0	13.5	18.0	29.0	40.0	51.0	62.0	73.0	84.0	95.0	99.5
t(min)	0	2.71	3.62	5.83	8.04	10.25	12.46	14.67	16.88	19.10	20.00
√E	0	1.6	1.9	2.4	2.8	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.5
n1/n0	1	0.712	0.712	0.592	0.502	0.418	0.356	0.272	0.252	0.252	0.294
1	0.838	0.754	0.670	0.544	0.544	0.376	0.376	0.294	0.210	0.210	0.210
1	0.754	0.732	0.670	0.566	0.502	0.356	0.252	0.210	0.188	0.230	0.230
1	0.796	0.796	0.754	0.586	0.482	0.460	0.418	0.294	0.294	0.210	0.210
平均	0.775	0.749	0.672	0.550	0.487	0.387	0.330	0.263	0.236	0.236	0.236
t(min)	0	2.04	2.71	4.37	6.03	7.69	9.35	11.01	12.66	14.32	15.00
√E	0	1.4	1.6	2.1	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	3.9
n1/n0	1	0.71	0.73	0.71	0.65	0.59	0.54	0.48	0.38	0.38	0.33
1	0.86	0.86	0.90	0.75	0.80	0.57	0.48	0.42	0.31	0.29	0.29
1	0.79	0.80	0.80	0.70	0.70	0.56	0.48	0.40	0.35	0.31	0.31
t(min)	0	1.36	1.81	2.92	4.02	5.23	6.23	7.33	8.45	9.55	10.00
√E	0	1.16	1.35	1.71	2.00	2.26	2.50	2.71	2.91	3.09	3.16
n1/n0	1	0.92	0.75	0.58	0.46	0.33	0.31	0.21	0.21	0.17	0.17
1	0.88	0.84	0.75	0.59	0.46	0.29	0.29	0.21	0.15	0.13	0.13
1	0.88	0.82	0.80	0.71	0.59	0.46	0.38	0.29	0.25	0.25	0.25
1	0.74	0.71	0.63	0.59	0.50	0.42	0.42	0.34	0.29	0.25	0.25
平均	0.86	0.78	0.69	0.59	0.47	0.37	0.33	0.26	0.22	0.20	0.20

表-3 ε_0 の計算値

滞留時間	dmax	S_m	me	$\log(n_1/n_0)/\sqrt{t_e}$	ε_0
10min	300 μ	4.2×10^3	1.6	-2.7×10^{-3}	0.5
15	350	6.7×10^3	1.4	-3.5×10^{-3}	2.0
20	400	1.0×10^4	1.1	-4.8×10^{-3}	6.9

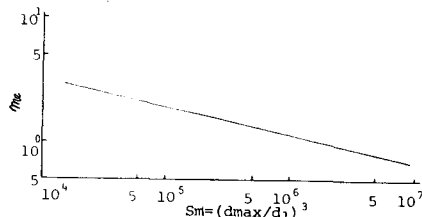


図-3 me と S_m の関係

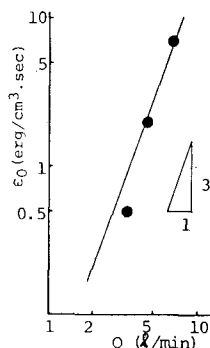


図-4 ε_0 と Q の関係