

厚生省水道環境部 正 ○ 海野 英明
東京大学 正 松尾 友矩

1. はじめに 3 遍や凝集沈殿等の水処理プロセスにおいて、フロックの強度はあらゆる意味でその処理効率に大きな影響をもたらすと考えられる。しかしフロック強度に関する研究は非常に少なく、定量化も完全ではない。ここでは乱流中でフロックに働く応力を評価し、フロック強度を水とフロックとの界面力で表示しようとした。試みたもので、その一部を報告する。

2. フロックに働く力とフロック強度の表示 フロックに働く瞬間的な応力は評価しにくい。その目安を与えてくれるものとして、横方向の局所的距離 (r) と平均的な速度差 ($\bar{u}(r)$) の関係を用いた平均応力 ($\bar{\tau}$) を考えると、

$$\bar{\tau} = \mu \frac{\partial \bar{u}(r)}{\partial r} = \mu \frac{2}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \quad \text{--- (1)} \quad r < l_s \text{ (粘性小領域)}$$

但し、 ϵ : 単位時間単位質量当りのエネルギー消散率

ν : 動粘性率

l_s : コルモゴロフスケール ($\sqrt[4]{\nu^3/\epsilon}$)

のようである。フロックの形成・破壊はほぼ粘性小領域内で進行しており、しかも $r \sim l_s$ の領域でも図1が示明らかな様に(1)式はほぼ成立する。フロックの界面力を σ_f (dyn/cm) で表わしフロック径を d とすると、(1)式よりフロックに働く平均応力と抵抗力の比は無次元数 N_{we} で表わされる。即ち

$$N_{we} = \frac{\bar{\tau} d^2}{\sigma_f d} = \frac{\mu \frac{2}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} d}{\sigma_f} \quad \text{--- (2)}$$

であり、破壊をもたらす N_{we} の最小値を $(N_{we})_{crit}$ とすると(2)式より、

$$\sigma_f = \frac{\mu \frac{2}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} d}{(N_{we})_{crit}} \quad \text{--- (3)}$$

でフロックの界面力は算定できる。

3. 実験 実験装置は図2に示したものを 20°C

の恒温室内に設置した。管路の両端にはバルブを付した。実験手順は、①ジャーテストと分散槽を任意の水位差に調整しておく。②ジャーテスト内に蒸留水を満ちし、バソ土投入後の pH が 7.0 となる様に NaHCO_3 を投入する。③ 60 rpm で攪拌し、関東ローム粘土 (粒度分布はほぼ平均径 1.67 μ の対数正規分布に従う) を濃度 50 ppm となる様に投入し、バソ土及びアルギン酸ソーダを所定量投入する。④ 60 rpm で 2 分、30 rpm で 20 分攪拌後、図2の仕切り板を上げ同時に A を開く。⑤ フロックは管内の乱流エネルギーにより破壊され、分散槽に流入する。このとき B より水は補給され C より排出されるので、水位差は一定に保たれる。⑥ 分散槽内のフロックを採取あるいはサンプリングして顕微鏡写真に撮らせて粒度分布を求めた。尚、水位差と平均流速との関係は予備実験より求めておいた。又管路の長さ及び径を変えて予備実験を行ない所定のものを採用した。管内の流速を熱線流速計で測定した結果、流速及び速度変動成分の分布が Lawler 等の結果とはほぼ一致する事を確かめ得た。 $(N_{we})_{crit}$ の値を求める為にシクロヘキサール ($\rho = 0.968$, $\sigma = 3.1 \text{ dyn/cm}$) の液滴について同様の実験を行なった。但しジャーテスト内での攪拌は 30 rpm で 1 分間とした。

図1. 局所等粘性乱流の普遍的相関関係²⁾
(但し、縦方向の相関に於て)

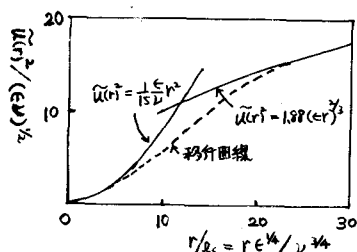
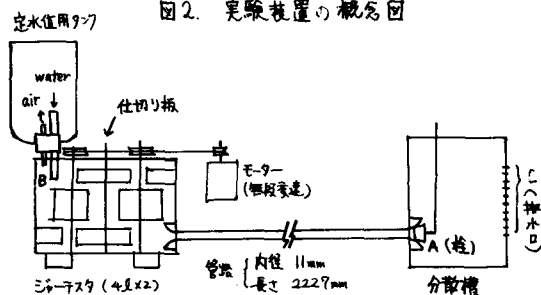


図2. 実験装置の概念図



4. 結果の解析 結果の解析に当って、エネルギーの直接散逸成分は非常に大きい(全体の50%以上)が、非常に薄い層内で散逸しているので無視し得ると考え、 ϵ として(4)式で示す様に全散逸より計算で求めた直接散逸分を引いたものの管断面内平均値を用いた。

$$\epsilon = \frac{\bar{u} g h_f}{L} - \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi (R-y) \left(\frac{du}{dy} \right)^2 dy \dots\dots(4)$$

$$\left[\begin{array}{l} \bar{u}/u_c = u_c y/L \quad (0 < u_c y/L < 4) \\ \bar{u}/u_c = 5.0 \ln u_c y/L - 3.05 \quad (4 < u_c y/L < 50) \\ \bar{u}/u_c = 2.5 \ln u_c y/L + 5.5 \quad (50 < u_c y/L) \end{array} \right]$$

$\bar{u}$: 平均流速 g : 重力加速度
 h_f : 損失水頭 L : 管長
 R : 管の半径 u_c : 摩擦速度

又粒径 d としては、断面平均的な意味で体積平均径 d_{50} を用いた。シクロ(ハキサ)ールの予備実験より $(N_{we})_{crit} = 7.6 \times 10^{-3}$ を得たので、(3)式を用いてフロックの界面力を試算した。その例を図3に示し、計算例の一部を表1に掲げた。結果としてはフロック界面力のオーダーは 1 (dyn/cm) 程度であり、アルギン酸ソーダを加えたものはかなり大きな界面力をもつ。

5. 考察 本報告に対比するものとして、九州大学の楠田等が、³⁾砂糖漿中におけるクエット流(図4参照)でフロックを破壊させてせん断強度を求めたものがある。そこではフロックのせん断強度 τ_s は、

$$\tau_s = \mu_c \frac{d\bar{u}}{dy} \dots\dots(5) \quad \mu_c: \text{砂糖漿の粘性係数}$$

として求めてあり、大体 $\tau_s \approx 10^2 \text{ (dyn/cm}^2\text{)}$ のオーダーの値を得ている。Taylor のクエット流⁴⁾中での表面破壊実験によると(図4参照)、 $\mu_c \approx \mu d$ のとき $(N_{we})_{crit} \approx 1$ が得られている。故に楠田等のものについて $\tau_s = \bar{\tau}$ として(2)、(3)式に代入して G_s を求めると $d \approx 10^{-2} \text{ (cm)}$ のオーダー故 $G_s \approx 1 \text{ (dyn/cm)}$ のオーダーとなり、本実験の結果と一致する。乱流下において $(N_{we})_{crit} \approx 10^{-2}$ 程度と小さい値を示す事については、図4でも示される通り $(N_{we})_{crit}$ は流れの条件によって変化する事が確かめられており、それ程不自然ではないと考えられる。又フロックに働く応力として最大応力を評価したものでなく、平均応力を評価した事も $(N_{we})_{crit}$ を小さく評価した原因になっていると考えられる。しかしこの報告では、フロックの界面力を表面の界面力と等価なものとして議論しており、シクロ(ハキサ)ールの溶解度が無視し得ない点と共に今後問題も残る。

6. 結論 フロックの強度を一種の界面力として評価し、そのオーダーとして 1 (dyn/cm) 程度の値を得た。バン土の注入率等によってその値は変化し、強度に対するバン土の最適注入率も存在する様である。

7. 参考文献

- 1) 松尾友矩; フロックの破壊機構と強度に関する研究, 土木学会論文報告集 Vol. 229
- 2) J. C. フタタ; 乱流, 岩波書店
- 3) 楠田哲世等; 単一フロックの基礎的性質(II), 第25回全国水道研究発表会
- 4) J. O. Hinze; Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes, A.I.Ch.E. Journal Vol. 1,

図3. フロックの界面力

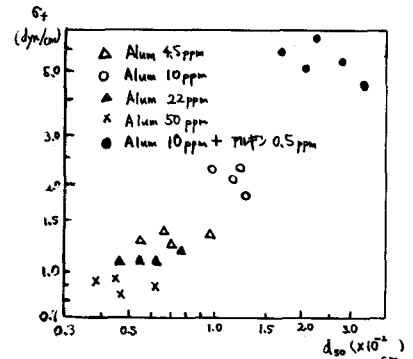


表1. 界面力の計算例 (Alum 4.5ppm)

$d_{50} (\times 10^2 \text{ cm})$	0.95	0.71	0.68	0.55
$h_f \text{ (cm)}$	7.0	8.8	10.8	12.6
$\bar{u} \text{ (cm/sec)}$	43.1	48.9	54.7	59.7
$\bar{u}^2 \text{ (cm}^2\text{/sec}^2\text{)}$	1201	1754	2455	3191
$E \text{ (cm}^2\text{/sec}^2\text{)}$	719	1056	1487	1940
$\epsilon \text{ (cm}^2\text{/sec}^2\text{)}$	482	698	968	1251
$G_s \text{ (dyn/cm)}$	1.4	1.3	1.4	1.3

図4. Taylor の層流中での表面破壊実験⁴⁾

