

有核微生物フロックの成長限界と粒子状媒体の 最適添加量に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON GROWING LIMITATION OF SUSPENDED BIOMASS
FLOCS WITH SMALL SIZE MEDIA AND OPTIMUM INPUT OF MEDIA IN A REACTOR

出口 浩*・柏谷 衛**

By Hiroshi DEGUCHI and Mamoru KASHIWAYA

Laboratory tests on biological treatment process applying suspended biological flocs with glass beads media which has 0.1 mm and 0.05 mm each in diameter have been carried out to investigate both the critical diameter of biomass flocs and the optimum input rate of media in a reactor.

It was confirmed from the tests that the critical diameter was proportional to rms velocity gradient (at a range of 10 to 2500 s⁻¹) to the minus one-half power. An estimation of the optimum input rate was also found to be possible by setting up the VSS concentration in reactor.

Keywords: biological treatment process, glass beads, critical diameter, optimum input rate

1. ま え が き

反応槽に微細な粒子状媒体（以下、媒体という）を添加して、その媒体を浮遊させながら行う下水の生物処理プロセスでは、媒体の表面が微生物によって覆われ、これが成長して媒体を核とする微生物フロック（以下、単に有核フロックという）を形成する。有核フロックでは微生物の沈降および圧密が良好に行われて、反応槽内に高濃度の微生物（VSS）を蓄積できることから、従来からの浮遊生物法に比べて効率のよい処理を行えることが見出されてきた^{1),2)}。

これらの実験では、媒体としてガラスビーズ（比重2.47）を用い、それらをエアレーションと機械的な攪拌により浮遊させたが、粒子径によって媒体表面への微生物付着状況は異なった。すなわち、径0.2 mm媒体では、核をもたない微生物フロック（以下、無核フロックという）が増加し、有核フロックは約10%存在したに過ぎなかった¹⁾。径0.1 mm媒体および径0.05 mm媒体は、容易に微生物フロックの核となり、微生物の蓄積に対し

てきわめて有効に作用した。

有核フロックを反応槽内で完全に浮遊させるには、エアレーションのほかに機械的な攪拌を要する。反応槽への媒体の添加量が増加すると、有核フロックを浮遊させる回転数も増加しなければならない。したがって、有核フロックは、機械的外力による攪拌強度に対応するせん断力を受ける。そして与えられた攪拌強度のもとで、成長できるフロック径が決まってくる。

本研究では、過去の実験^{1),2)}から好結果が得られた径0.1 mmおよび径0.05 mmのガラスビーズを用い、得られた有核フロックを浮遊させる攪拌強度とそれらのフロックの成長限界との関係を、微生物フロックの破壊機構³⁾と関連づけて説明することを室内実験によって試みた。さらに、槽内への媒体添加量の最適値を有核微生物フロック1個当たりが保持する微生物量から求めることを合わせて検討した。

2. 反応槽内の有核フロック径の成長限界

(1) 有核フロックの受ける外力

フロックの形成、破壊または強度に関する研究では、フロック径 d が、Kolmogorov の最小渦径 λ を境に、粘性小領域 ($0 \leq d \ll \lambda$) または慣性小領域 ($\lambda \ll d$) のいずれに属するかによって、フロックの受ける支配的な力の

* 学生会員 工修 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒278 千葉県野田市山崎 2641)

** 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

関係を区別し、いくつかの理論が提案されてきた³⁾⁻⁵⁾。

松尾は、微生物のフロックを流体自体に置き換えた場合に、フロックが流体運動から受ける力は、その流体の微小要素が受ける力に等しいと考えて、Navier-Stokesの方程式を用いて表わした³⁾。すなわち、 x 軸方向についての力のつり合いをとると、式(1)のように示される。

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \\ & = \left(\rho X - \frac{\partial P}{\partial x} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \\ & + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

流速を平均流速とその変動速度成分に分けて、 $U = \bar{U} + u$, $V = \bar{V} + v$, $W = \bar{W} + w$ と表わすと微小流体塊に作用する力は式(2)のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \rho \delta_x \delta_y \delta_z \frac{\partial u}{\partial t} & = \left(\rho X - \frac{\partial P}{\partial x} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \\ & - \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \\ & + \mu \left[2 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \delta_x \delta_y \delta_z \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

松尾は無核フロックをシェルモデルにより説明し、フロックの受ける外力はフロック表面のごく薄いリング状部分によって抵抗するとしている³⁾。この考えは微細な媒体を含む有核フロックに対しても適用でき、フロック内に存在する媒体は外力に対しては何ら関係しないものであると考えることができる。すなわち、媒体はフロックの重量を高める役割のみをもつものである。

有核フロックは、エアレーションおよび機械的な攪拌によって流体中を浮遊することになるので、それが流体運動から受ける力も式(2)と同様に表わすことができる。

径0.1 mmおよび径0.05 mmの媒体を用いた実験⁶⁾で得られた有核フロックのモデルは、Fig. 1に示したような過程を経て成長してきていることが顕微鏡観察より確認された。すなわち、径0.1 mm媒体の有核フロックは常に媒体1個を含んでおり、その表面を微生物が覆うように成長していき、さらに微生物の厚みが増加することで有核フロックを形成した。これに対して、径0.05 mm媒体の有核フロックは、初めは前者と同様に、媒体1個の表面を微生物が覆うが、しだいにこれらの微小な有核フロックが結合して、ある大ききまで成長して媒体7~10個を有する有核フロックを形成した。この有核フロックの含まれる媒体数はこれ以上は増加せず、媒体を取り巻く微生物の厚みが増加することでフロックを形成

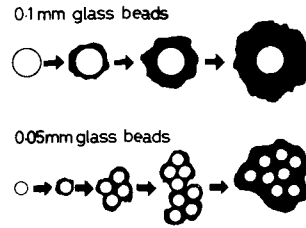


Fig. 1 Growing of Biomass Flocs.

した。

これらの有核フロックはやや楕円体をなしており、長径と短径との比の平均は前者では1:0.85、後者では1:0.6であった。

両媒体の有核フロックとも顕微鏡写真の4方向測定による平均の成長限界半径 d_c は0.25ないし0.35 mmの範囲にあり、攪拌強度 G に対応する λ は0.1 mm以下であった。これは慣性小領域に属するものであると考えられる。

このことから、有核フロックの d_c が受ける影響は、慣性小領域において生ずるとして、 G と d_c との関係を検討した。

有核フロックは、その表面に作用するせん断力によって主に破壊されていくとすると、慣性小領域においては、式(2)の右辺第2項のうち第2または第3項のいずれかがせん断力の瞬間的な最大値 F を与えることになり、その値は松尾³⁾によって示された微生物のフロックの場合と同様に表わされる。すなわち、

$$F = \rho v \frac{\partial u}{\partial y} \delta_x \delta_y \delta_z \doteq \rho v^* \delta^2 \dots \dots \dots (3)$$

さらに、距離 r だけ離れた2点間の速度差 $\bar{v}(r)$ の2乗の平均として、その構造関数を式(4)に示すように定義する⁷⁾。

$$\overline{\bar{v}^2(r)} = |\overline{\bar{v}^2(r) - \bar{v}^2(0)}| = \beta(\epsilon r)^{2/3} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $r \doteq d$ であるとする、式(3)は式(5)として表わされる。

$$F \doteq \rho \bar{v}^2(d) d^2 = \rho \beta (\epsilon d)^{2/3} \cdot d^2 = \rho \beta (\epsilon)^{2/3} \cdot d^{8/3} \dots \dots \dots (5)$$

有核フロックがその表面に作用する F によって破壊される場合、有核フロックの側では F に対して抵抗力 B が作用していると考えられる。

有核フロックが球体であると仮定し、その赤道面での破壊を想定する場合には、 B をフロックのせん断応力度 τ と破断面の面積 A の積として表わすことができる。しかし、これまでの有核フロックの顕微鏡観察では、赤道面で破壊が生じたと認められるフロックは存在しなかった。また、 F に対するフロック抵抗力の発生メカニズム³⁾から、有核フロックは F の作用により、その表面が侵食されるように破壊されるものとした。この場合、

破断面の面積を正確に求めることは困難なので、ここでは B を τ および A を含めた総合的な抵抗力 B' として扱った。

有核フロックが破壊されるときには、 $B' = F$ になると考えられる。この関係を代入して、式 (5) を整理すると、与えられた G に対する d_c は、式 (6) で表わすことができる。

$$d_c = \{B' / (\rho \cdot \beta)\}^{3/8} \cdot \mu^{-1/4} \cdot (\mu / \epsilon)^{1/4} = a \cdot G^{-1/2} \dots\dots (6)$$

ここに、 $a = \{B' / (\rho \cdot \beta)\}^{3/8} \cdot \mu^{-1/4}$

$$G = (\epsilon / \mu)^{1/2}$$

有核フロックは、エアレーションおよび機械攪拌を同時に受けていることから、エアレーションによるエネルギー消費率 ϵ_a ⁸⁾ と機械攪拌によるエネルギー消費率 ϵ_m ^{5),9)} が式 (7) によって求められ、 G は式 (8) から計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a &= Q\gamma h / V \\ \epsilon_m &= 0.1 \cdot 980 \cdot T\omega / V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$G = \{(\epsilon_a + \epsilon_m) / \mu\}^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

(2) 微生物フロックの成長限界に関する実験

実験に使用した回分式反応槽とその付属品の構成を Fig. 2 に示す。人工下水供給部では、人工下水濃厚液 (BOD 濃度で 2, 4, 5, 6, 8 g/l) を冷却保存し、その都度一定量を取り出して、水道水で 20 倍に希釈した人工下水に調整して、小型ポンプにて反応槽に供給した。

反応槽は直径 0.3 m、高さ 0.5 m、有効容積 30 l で、散気装置とプロペラ型の攪拌翼を備えている。攪拌翼の設置位置は、反応槽底面より全水深の 1/3 とした。

媒体として、径 0.1 mm および径 0.05 mm のガラスビーズを反応槽に対する容積比で、それぞれ 1, 3, 5, 7, 10 % 添加した。そして、これらがすべて懸濁浮遊できる最小回転数を予備実験により選定した。その結果、懸濁浮遊に必要な最小回転数は、径 0.1 mm 媒体でそれぞれ 50, 71, 79, 85, 93 rpm、径 0.05 mm 媒体でそれぞれ 42, 63, 71, 72, 75 rpm となった。

反応槽の運転は、人工下水の供給、エアレーションお

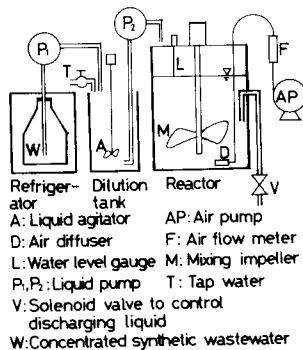


Fig. 2 Experimental Sequencing Batch Reacting Apparatus.

よび攪拌、沈殿、排水を含めて 1 サイクルを 4 時間、反応槽に供給する人工下水量は 15 l (一定) に設定した。

反応槽に媒体を加えずに運転したものを対照とし、エアレーションのみ、エアレーションと機械的な攪拌 (回転数 10 ないし 30 rpm) 併用との 2 種類とした。

測定は、空気吹込み量 Q 、攪拌機の回転数 N とトルク T 、および微生物フロック径について行った。

微生物フロックは、実験期間を通じて 3~4 日おきに顕微鏡写真をそれぞれ 8 枚以上撮り、その中のフロック 12 個以上について、長径とそれに 45°, 90°, 135° の角度をなす方向に径を測定し、その平均をフロック径とした。これらを実験条件ごとに整理して最大径のものを d_c とした。

(3) 実験結果とその考察

a) BOD 負荷の影響

BOD-VSS 負荷と d_c との関係および BOD 容積負荷と d_c との関係を一例として添加率 5 % について、それぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示した。

BOD-VSS 負荷を 0.13 から 0.55 kg/kg·d の範囲で、BOD 容積負荷を 0.6 から 1.2 kg/m³·d の範囲で変化させたが、有核フロックの d_c は、径 0.1 mm 媒体で 0.24 から 0.27 mm、径 0.05 mm 媒体で 0.25 から 0.29 mm であり、両者はほぼ同じとみなすことができた。また、対照の無核フロックは 0.39 から 0.43 mm であり、有核フロックよりも 50 % 程度高い値を示した。粒子径、添加量のいずれの場合でも、BOD-VSS 負荷および BOD

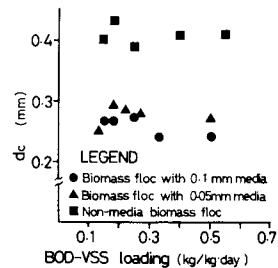


Fig. 3 Relationship Between BOD-VSS Loading and Critical Diameter of Biomass Flocs.

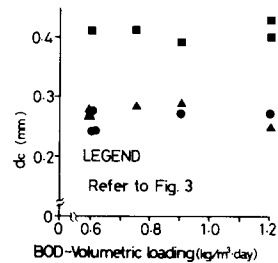


Fig. 4 Relationship Between BOD-Volumetric Loading and Critical Diameter of Biomass Flocs.

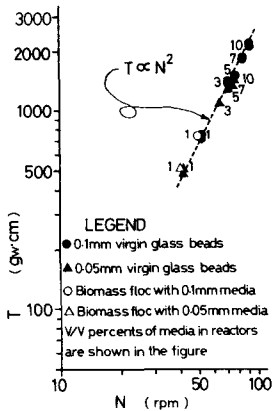


Fig. 5 Relationship Between Revolution of Mixing Impeller and the Torque at Liquid Filled Conditions.

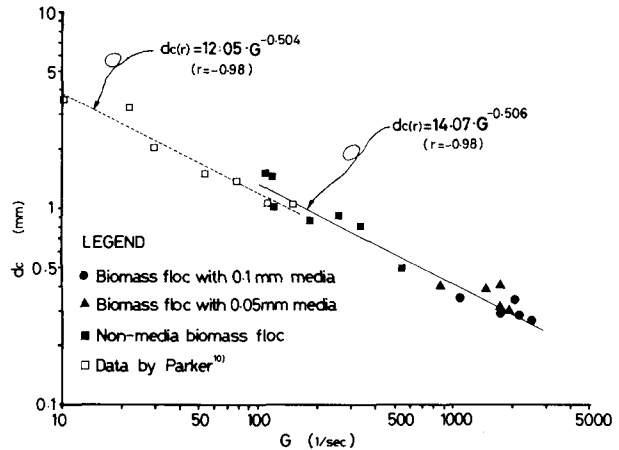


Fig. 6 Relationship Between Rms Velocity Gradient and Critical Diameter of Biomass Flocs.

容積負荷によって d_c は大きく影響を受けることはなかった。このことは、有核フロックについては添加したそれぞれの媒体が浮遊できる最小の回転数で攪拌したこと、無核フロックでも全フロックが浮遊する最小の攪拌を与えたことで、攪拌強度の影響が大きく現われたものと考えられる。

b) 攪拌強度の影響

微生物フロックの存在しない状態で媒体添加率に対応する N と T の関係を両対数紙上に示したのが Fig. 5 である。媒体の添加率 10% 以下について、 N と T の間に一定の関係が認められた。同図には、有核フロックが 100% を占めた添加率 1% の場合の N と T の関係を合わせて示した。これらの、 N と T の関係は、有核フロックが形成された後も変化していない。

G と d_c との関係を Fig. 6 に示す。同図には、Parker による活性汚泥フロックのデータ¹⁰⁾ を著者の d_c の考え方に基づき整理して、合わせて示した。

Parker によって得られたデータはすべて無核フロックによるものであり、 G は 10 から 150 s^{-1} の範囲に存在した¹⁰⁾。そして、 G の増加に伴って d_c は減少する傾向を示した。

本実験で得られたデータは無核フロックと有核フロックとにより成るものであり、 G は 110 から 2500 s^{-1} の広い範囲に分布していた。本実験で得られた G が 110 から 150 s^{-1} の間の無核フロックの G と d_c との関係は、Parker によるものと近似しており、この間の両データの G と d_c との関係には相違がないと考えられた。

本実験から得られた G と d_c の関係は、 G の広い範囲において G の増加とともに d_c が減少する傾向を示しており、その勾配も Parker のデータによる G と d_c との関係に類似したものであった。

c) 考 察

Fig. 3 および Fig. 4 から、BOD-VSS 負荷と BOD 容積負荷の変化に対して、 d_c はほぼ一定な値を示すことが見出された。 d_c は BOD 負荷によって定まるのではなく、 G によって定まる。このことは、槽内微生物の蓄積が有核フロックの径の拡大によるものではなく、フロック数の増加によるものであることを示している。

すべての媒体に微生物が完全に付着したと認められた径 0.1 mm 媒体の添加率 1%、径 0.05 mm 媒体の添加率 1% について、有核フロックと微生物付着のない媒体との浮遊に要する攪拌強度を比較検討した。有核フロックの懸濁浮遊に必要な最小回転数は、媒体のすべてが有核フロックの核となった添加率 1% の場合について測定している。最小回転数は径 0.1 mm 媒体のフロックでは 50 rpm、径 0.05 mm 媒体のフロックでは 42 rpm であり、いずれも初期設定（微生物付着のない媒体を浮遊させるのに要する最小回転数）の回転数と同じであった。すなわち、媒体に微生物が付着しても浮遊させるに必要な最小回転数を変えることにはならなかった。

松尾は外力に対するフロックの抵抗力の発生機構を説明するためにシェルモデルでフロックを表わし、フロック表面のごく薄いリング状の部分がフロックに作用する外力に対して抵抗すると述べている³⁾。著者らは、この考え方は無核フロックのみならず、媒体を含む微細な有核フロックにも適用できると考えた。そして、慣性小領域におけるフロックの破壊は、流体から受けるせん断力によって、その表面が侵食されて生ずるものと考え、式 (6) を導いた。この式で、 d_c は $G^{-1/2}$ に比例している。

活性汚泥のフロックについて、Parker はフロック粒子の群が、堅い糸状ネットで結びつけられているとしたモデルを考えた。慣性小領域におけるこれらのフロック

群は、緊結している糸の部分に張力によって破壊される
として、安定して存在するフロックの最大径 d_s を求める
式 (9) を提案している⁴⁾。

$$d_s = C_3 \cdot G^{-1/2} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $C_3 = (3 \sigma_r A_r g^{8/3} / \rho_p \pi \beta v^{2/3})^{3/8}$

著者らによる式 (6) の d_c と Parker による式 (9)
の d_s とは、フロック破壊に関する見解の相違から、異
なるものであるが、 $G^{-1/2}$ に比例する点においては同じ
である。

Parker は大学構内の排水処理プラントの運転条件を
変えて実験を行い、各実験日ごとにエアレーションタン
クから得られた活性汚泥のフロック径を測定して、各日
ごとのフロック最大径のデータを提示している¹⁰⁾。この
フロック径のデータでは、各 G 値ごとの最大値で d_c を
代表させた。Fig. 6 には、著者らと Parker による実験
データから得られた G と d_c との関係を示した。

それぞれのデータについて d_c を $d_{cr} = a' \cdot G^b$ として
回帰すると、著者らのデータによる b' は -0.506 , Par
ker のデータによる b' は -0.504 となり、両者はほぼ一
致した。これらはともに式 (6) および式 (9) の G
の指数 $-1/2$ 乗とも一致している。

さらに係数 a' についても、著者らのデータによるも
の 14.07, Parker のデータによるもの 12.05 となり、
ほぼ等しくなった。したがって、著者らのデータと
Parker のデータとは、実験およびフロック径測定上の
誤差を考えると、 G と d_c との関係については同じであ
るとみて差し支えないであろう。

このことから、著者らのデータと Parker のデータと
を合わせて整理して回帰式を求めると式 (10) となり、
無核フロック、有核フロックを問わずシェルモデルとし
ての考え方が適用できることが確かめられた。

$$d_c = 11.3 \cdot G^{-0.48} \dots \dots \dots (10)$$

式 (6) の係数 a はフロックの総合的な抵抗力 B' を
含んでいる。この回帰式の係数 a' を式 (6) の係数 a
に等しいとして B' を算出すると、 B' は 0.0016 dyne と
なった。同様にして、式 (9) の係数 C_3 が回帰式の係
数 a' に等しいとしてフロックの抵抗力を示す $\sigma_r A_r$ を求
めると、 $\sigma_r A_r$ は 0.0040 dyne となり、 B' と $\sigma_r A_r$ のオー
ダーは等しいことが確認された。

3. 反応槽内の粒子状媒体添加率

(1) 媒体添加率の算出法

媒体添加率が過大であると、微生物を保有しない媒体
が多くなる。また、媒体添加率が過小であると、無核フ
ロックが増加して、反応槽内での媒体添加の効果が発揮
されない。このことから、媒体の最適添加率を有核フロッ
ク 1 個が保持する微生物 (VSS) 量と反応槽内の全有

核フロックが保持している VSS 総量 (以下、VSS 総
量という) との関係から表わすことを試みた。

VSS 総量を $X_V \cdot V$ で表わし、 m 個の媒体が有核フ
ロック中に含まれているとすると、有核フロックの個数
 N_p は、微生物体の乾燥単位体積重量 γ_d を用いて式 (11)
で表わされる。

$$N_p = X_V \cdot V / \gamma_d (V_F - m \cdot V_p) \dots \dots \dots (11)$$

反応槽への媒体の添加率 A_p を、反応槽の有効水容積
に対する添加した媒体体積の百分率として定義すると、
媒体が過不足なくフロックの核となり得る媒体添加率
 A_p は式 (12) によって表わされる。

$$A_p = 100 \cdot V_p \cdot m \cdot N_p / V \dots \dots \dots (12)$$

式 (12) は、式 (11) を代入して式 (13) として表わす
ことができる。

$$A_p = 100 \cdot m \cdot V_p \cdot X_V / \{\gamma_d \cdot (V_F - m \cdot V_p)\} \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 V_p は既知であり、 X_V , V_F は実験により求まる。
微生物体の単位体積重量 γ_B は、空隙率 n を用いて式
(14) で表わすことができる。

$$\gamma_B = \gamma_s \cdot (1 - n) + \gamma_w \cdot n \dots \dots \dots (14)$$

ここで γ_B , γ_s , γ_w は測定できるので、式 (14) からは n
が求められる。したがって γ_d は式 (15) から算出できる。

$$\gamma_d = \gamma_s \cdot (1 - n) \dots \dots \dots (15)$$

(2) 媒体の添加率に関する実験

実験装置、実験に使用した媒体の種類と添加率および
人工下水については前章 (2), a) に示したのと同じで
ある。

測定は、槽内微生物量、微生物フロック径、 γ_B およ
び γ_s について行った。

槽内微生物量はすべて VSS として測定した。この測
定では、槽内からサイフォン管で 50 ないし 60 ml の試
料 2 本を同時に採取して、1 本は槽内 VSS の測定、他
の 1 本は有核フロック量および無核フロック量を分離測
定するのに用いた。この分離測定では、容量 300 ml の
三角フラスコを用いて、1 回当たり 100 から 200 ml の
蒸留水を加えて、三角フラスコ内に浮遊物が肉眼で認め
られなくなるまで洗い出す操作を繰り返し、フラスコ内
に残留したものを有核フロック、洗い出されたものを無
核フロックとした。VSS 測定のための濃縮は遠心分離
法 (3000 rpm, 5 分間) により、強熱は 60°C の電気
炉で 60 分間行った。VSS 測定後の媒体は再び反応槽に
戻し、媒体は常に一定に保つようにした。

γ_B の測定は、三谷らによる微生物体密度の測定¹¹⁾ に準
じて行った。また、 γ_s の測定は下水試験法¹²⁾ に従った。
微生物フロック径の測定は、前章 (2), a) と同様であ
る。

反応槽内の微生物付着率 B_p を求めるために、槽内に
添加率 A_p で媒体を加え、よく攪拌した後、その内容物

を1 lメスシリンダーに分取して、微生物付着のない媒体の体積 V_1 を測定した。有核フロックの成長に伴って、その都度、混合液を1 lメスシリンダーに分取し、30分間沈降後、沈殿物内の微生物付着のない媒体の体積 V_2 を測定した。そして式(16)によって媒体添加率に換算した B_p を求めた。

$$B_p = A_p \cdot (V_1 - V_2) / V_1 \dots\dots\dots (16)$$

(3) 実験結果とその考察

a) 有核フロック1個当たりの体積

径0.1 mm媒体の有核フロックでは短径/長径の範囲は0.7から1であり、径0.05 mm媒体の有核フロックのそれは0.3から0.96であった。有核フロックは4方向測定結果の平均径を球体とした体積と、長径を回転軸とした回転楕円体としての体積をそれぞれ求めた。この結果、径0.1 mm媒体の有核フロックでは、これら両体積の差は5%以内にとどまった。これに対して、径0.05 mm媒体の有核フロックでは平均径の球体としての体積が回転楕円体としての体積を約15%上回った。

それぞれの有核フロックで球体としての体積と回転楕円体としての体積を X_v について回帰式を求め、いずれの場合に X_v との関係において良好な相関関係が得られるかを調べた。その結果、径0.1 mm媒体の有核フロックでは相関係数の差は0.03にとどまっております、両者の間に差はなかった。これに対して、径0.05 mm媒体の有核フロックでは両者の相関係数の差が0.12であり、回転楕円体としてフロック体積を表わした場合に良好な相関関係が得られた。

Fig. 7は、両有核フロックについて回転楕円体としての体積 V_f と X_v との関係を示したものである。これらの回帰式の係数はほぼ一致していた。

b) X_v と B_p の関係

式(16)によって求めた B_p と X_v との関係を図8に示す。径0.1 mm媒体の有核フロックでは、 X_v が2から7 g/lの範囲で B_p は2ないし2.9%であった。径0.05 mm媒体の有核フロックでは、フロック1個に含まれる媒体の個数 (m は7から10個) によって B_p に違いがみられ、 m が大きいほど B_p は高くなる傾向が認められた。 X_v が3から7 g/lの範囲で、 m が7個の場合に B_p は1.2から1.9%、 m が10個の場合に2から2.5%となった。また、 X_v が3 g/l以下では B_p の測定は困難なことが多かった。

c) 考察

A_p は、 X_v , m , V_p , V_f , γ_d を変数として式(13)で示すことができた。このうち、 V_p は既知であり、 X_v は設定しようとする濃度である。また、 m は、 T および添加する媒体の径によって実験的に定められる係数である。すなわち、径0.1 mm媒体の有核フロックでは、 T

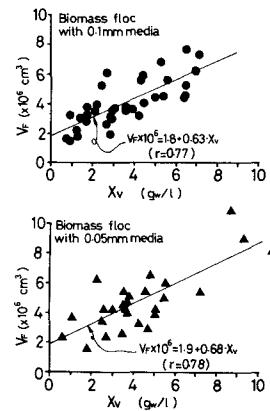


Fig. 7 Relationship Between VSS Concentrations and Their Occupied Mass in Reactors.

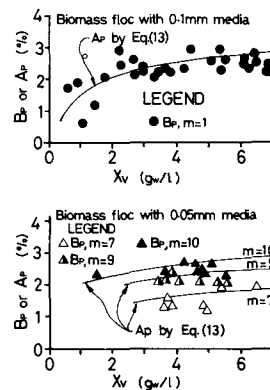


Fig. 8 Relationship Between VSS Concentrations and Biomass Attached Rate (B_p) or Input Rate of Media (A_p).

が750から2100 g·cmの広い範囲で m は常に1個であった。径0.05 mm媒体の有核フロックでは T が 950 ± 100 g·cmで m は10個、 1150 ± 100 g·cmで m は9個、 1300 ± 50 g·cmで m は7個であった。

本実験で得られた γ_d は 0.024 g/cm³ であったが、 γ_d は下水に含まれる基質の種類によって定まると考えられる。Atkinsonらによる人工下水を用いた流動床の実験で、網状ポリエチレンシートを使用した場合に、 γ_d は同様の数値が得られていた¹³⁾。

A_p に直接影響するのは V_f である。Fig. 7に示した X_v と両有核フロックの V_f との関係を表わす回帰式がほぼ等しかったことから、これらを整理すると、 $V_f \times 10^6 = 1.8 + 0.65 \cdot X_v$ で表わされ、これより V_f は算出できる。

これらの関係を導入し、さらに維持しようとする X_v を設定すれば、 A_p は式(13)によって求めることができる。

Fig. 8には B_p に対する A_p の精度を示すため、 B_p の

実測値とともに、 A_p の計算値を実線で示した。径 0.1 mm 媒体の有核フロックで、 X_v が 3 g/l では B_p 約 2.3 % に対して A_p 2.35 % であり、 X_v が 6 g/l では B_p 約 2.65 % に対して A_p 2.75 % であった。

径 0.05 mm 媒体の有核フロックでは、フロック 1 個に含まれる媒体の個数によって、 B_p と A_p はともに変化した。 X_v が 4 g/l、 m が 7 個の場合には B_p 約 1.5 % に対して A_p 1.65 % であり、 m が 10 個の場合には B_p 約 2.5 % に対して A_p 2.6 % であり、 B_p と A_p はほぼ一致した。これより、 A_p の式 (13) を用いての推算結果は、精度の点からも問題のないことが示された。

4. 結 論

反応槽に径 0.1 mm 媒体および径 0.05 mm 媒体を添加し、これらをエアレーションおよび機械攪拌によって懸濁、浮遊させて行う下水の生物処理プロセスで、攪拌強度と有核フロックの成長限界径との関係を示すとともに、媒体添加率を推算することを室内実験により検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 有核フロックは添加する媒体の粒子径によってその形状に相違がみられた。径 0.1 mm 媒体では有核フロックに媒体が 1 個のみ含まれ、径 0.05 mm 媒体では 7 ないし 10 個が含まれていた。顕微鏡写真 4 方向測定結果より求めた成長限界径 d_c は 0.25 ないし 0.35 mm であり、ともに慣性小領域に属するものであった。

(2) BOD-VSS 負荷と BOD 容積負荷の変化および媒体の粒子径の変化に対して d_c はほぼ一定の値を示した。反応槽内での微生物の蓄積は、有核フロックの径の拡大によるものではなく、フロック数の増加によるものである。

(3) 微生物フロックは有核フロック、無核フロックを問わず、フロック表面のごく薄いリング状の部分が外力に対して抵抗すると考え、その破壊はフロックの表面が侵食されるように生ずるとして、 d_c が $G^{-1/2}$ に比例する式 (6) を導いた。本実験および Parker により得られたデータから、 G が 10 から 2500 s^{-1} の広い範囲において回帰式の G の指数は -0.48 となり式 (6) の G の指数にはほぼ一致した。式 (6) の係数 a はフロックの総合的な抵抗力 B' を含んでおり、 B' は式 (10) から 0.0016 dyne が得られた。

(4) 長径を回転軸とする回転楕円体としての有核フロックの体積 V_p は、 X_v についての回帰式が両フロックでほぼ一致し、相関係数も類似した。

(5) 実験による反応槽内の微生物付着率 B_p は、径 0.1 mm 媒体の有核フロックで X_v が 2 から 7 g/l の範囲で 2.0 から 2.9 % であった。径 0.05 mm 媒体の有核フロックで X_v が 3 から 7 g/l の範囲で、 m が 7 個の場

合に 1.2 から 1.9 %、 m が 10 個の場合で 2 から 2.5 % となった。 B_p は m によって変化し、 m は攪拌機のトルクによって変化することが見出された。

(6) 反応槽で媒体が過不足なくフロックの核となり得る媒体添加率 A_p は式 (13) で表わされ、反応槽内で維持しようとする X_v を設定することにより推算でき、それは精度の点からも問題のないことが示された。

記 号 表

A	: 破断面の面積 (cm^2)
A_p	: Parker による糸の部分の断面積 (cm^2)
A_p	: 反応槽で媒体が過不足なくフロックの核となり得る計算上の媒体添加率 (%)
A_p'	: 反応槽に添加した粒子状媒体の添加率 (%)
a	: 式 (6) による係数 (-)
a'	: 実験データからフロック成長限界径を攪拌強度 G の関数として表わした回帰式の係数 (-)
B	: 微生物フロックの抵抗力 (dyne)
B'	: 微生物フロックの総合的な抵抗力 (dyne)
B_p	: 微生物の媒体への付着率 (%)
b'	: 実験データからフロック成長限界径を攪拌強度 G の関数として表わした回帰式の G の指数 (-)
C_3	: Parker による式 (9) の係数 (-)
d	: 微生物フロック径 (mm)
d_c	: 微生物フロックの顕微鏡写真 4 方向測定結果より求めた成長限界径 (mm)
$d_{c,r}$: 実験データから攪拌強度 G の関数として回帰式で表わしたフロックの成長限界径 (mm)
d_s	: Parker による安定して存在するフロックの最大径 (mm)
F	: せん断力 (dyne)
G	: 攪拌強度 (1/s)
g	: Parker によるフロックの形状係数 (-)
h	: 散気装置設置位置の水深 (cm)
m	: 有核フロック 1 個に含まれる媒体数 (-)
N	: 攪拌機の回転数 (rpm)
N_p	: 有核フロックの個数 (-)
n	: 空隙率 (-)
P	: 流体圧 (dyne/cm ²)
Q	: エア一量 (cm ³ /s)
r	: 2 点間の距離 (cm)
T	: 攪拌機のトルク ($\text{g}_w \cdot \text{cm}$)
U, V, W	: x, y, z 軸方向の流速 (cm/s)
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$: x, y, z 軸方向の平均流速 (cm/s)
u, v, w	: x, y, z 軸方向の流速の変動速度成分 (cm/s)

V : 反応槽有効容積 (cm^3)
 V_F : 有核フロクの体積 (cm^3)
 V_P : 粒子状媒体 1 個の体積 (cm^3)
 V_1 : 微生物の存在しない反応槽から攪拌中に採取した, 媒体のシリンダーに占める体積 (cm^3)
 V_2 : 有核フロクが存在する反応槽から攪拌中に採取した, 微生物付着のない媒体のシリンダーに占める体積 (cm^3)
 v^* : u, v, w が同一になると仮定した流速の変動速度成分の大きさ (cm/s)
 $\bar{v}(r)$: 距離 r だけ離れた 2 点間の速度差 (cm/s)
 X : 質量力の x 軸方向の成分 (cm/s^2)
 X_V : 有核フロクの VSS 濃度 (g_w/l)
 β : 式 (4) による構造関数の係数 (—)
 γ : 混合液単位体積重量 (g_w/cm^3)
 γ_B : 微生物体の湿潤状態での単位体積重量 (g_w/cm^3)
 γ_a : 微生物体の乾燥状態での単位体積重量 (g_w/cm^3)
 γ_s : 微生物体乾燥固形物の単位体積重量 (g_w/cm^3)
 γ_w : 水の単位体積重量 (g_w/cm^3)
 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$: 流体の微小要素の x, y, z 軸方向のそれぞれの長さ (cm)
 δ : $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ が同一になると仮定した流体微小要素の長さ (cm)
 ϵ : 有効エネルギー消費率 ($\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)
 ϵ_a : エアレーションによる単位時間, 単位体積当たりのエネルギー消費率 ($\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)
 ϵ_m : 機械攪拌による単位時間, 単位体積当たりのエネルギー消費率 ($\text{erg}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)
 λ : Kolmogorov の最小渦径 $\lambda = (\nu^3 \cdot \rho / \epsilon)^{1/4}$ (cm)
 μ : 流体の粘性係数 (poise)
 ν : 流体の動粘性係数 (St)
 ρ : 流体の密度 (g/cm^3)
 ρ_p : Parker による粒子密度 (g/cm^3)

σ_f : Parker によるフロクを結びつけている糸状部分の引張応力度 (dyne/cm^2)
 τ : 単位面積当たりのせん断応力度 (dyne/cm^2)
 ω : 角速度 ($1/\text{s}$)

参考文献

- 1) 柏谷 衛・出口 浩：粒子状媒体添加室内回分式処理装置による硝化液循環プロセスの実験, 水質汚濁研究, Vol.9, No.11, pp.54~62, 1986.
- 2) 出口 浩・柏谷 衛・日下成人：粒子状媒体添加室内回分式処理装置による嫌気-無酸素-好気プロセスの実験, 水質汚濁研究, Vol.10, No.9, pp.44~53, 1987.
- 3) 松尾友矩：フロクの破壊機構と強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第229号, pp.31~39, 1974.
- 4) Parker, D.S., Kaufman, W.J. and Jenkins, D.: Floc Breakup in Turbulent Flocculation Processes, Proc. A.S.C.E. Vol.98, SA1, pp.79~99, 1972.
- 5) 丹保憲仁・山田浩一・穂積 準：フロク強度に関する研究, 水道協会雑誌, 第427号, pp.4~15, 1970.
- 6) 柏谷 衛・出口 浩・皆方久吉：粒子状媒体を用いた回分式生物処理実験, 第20回水質汚濁学会講演集, pp.241~242, 1986.
- 7) 日野幹雄：流体力学, 朝倉書店, pp.204~220, 1974.
- 8) Bewtra, J.K. and Nicholas, W.R.: Oxygenation from Diffused Air in Aeration Tanks, Journal WPCF, Vol.36, No.10, pp.1195~1197, 1964.
- 9) 水理公式集, 土木学会, 昭和60年版, pp.422~423.
- 10) Parker, D.S.: Characteristics of Biological Flocs in Turbulent Regimes, thesis presented to the University of California, at Berkeley, Calif., 1970.
- 11) 三谷知世・海野 肇・明島高司：活性汚泥フロクの構造モデル, 水質汚濁研究, Vol.6, No.2, pp.69~75, 1983.
- 12) 下水試験方法, 日本下水道協会, 1984年版, pp.304.
- 13) Atkinson, B., Black, G.M. and Pinches, A.: The characteristics of solid supports and biomass support particles when used in fluidised beds, in "Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater", edited by Cooper, P.F. et al. Ellis Horwood Ltd. pp.75~109, 1981.

(1987.8.13・受付)