

京都大学工学部 学生員 山根 智
京都大学 工学部 正 員 寺島 泰
京都大学 工学部 正 員 長尾正悟

1. はじめに 微生物付着流動層は、浮遊微生物タイプ的方式と異って高い生物濃度を維持でき、さらに生物膜法の利点が期待できるという特徴があり、研究開発が進められている。本研究では、好気性流動層の粒子流動、特に生物が付着した場合の流動現象と流動層における基質除去モデルについて検討を加え、これらの成果に基づき、生物付着流動層による廃水処理の設計法について考察した。

2. 流動機構に基づく微生物濃度の推定法 [1]基礎理論: 本研究では、流動層における粒子流動に関する研究成果のうち、空間率と他の流動因子との関係を示したWenとYuの研究結果に基づき、これを生物付着粒子の流動層にまで拡大して適用できるかどうかについて、1つには微生物付着によって膨張した層の高さ h を測定して微生物濃度 X を推定するという方法、他の1つは、Shiehらに従って微生物付着粒子径 d_p を測定して X を推定するという方法について検討する。まず、流動層内の粒子に働く抵抗力 F_R は、液体中の単一球形粒子に働く抵抗力 F_{R0} と、補正関数 $f(\varepsilon)$ によって(1)式で表わされる。

$F_R = f(\varepsilon) F_{R0}$ ----- (1) $f(\varepsilon)$ は、空間率 ε のみの関数であり、レイノルズ数 N_{Re} が1000以下までは、WenとYuによって次式が提示されている。

$f(\varepsilon) = N_{Ga} / (18 N_{Re} + 2.7 N_{Re}^{1.687})$ ----- (2)

ここで、 $N_{Ga} = d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g / \mu^2$, $N_{Re} = d_p \rho_f v / \mu$ ----- (3)

$\rho_p = \rho_m (d_m / d_p)^3 + \rho_{bw} [1 - (d_m / d_p)^3]$ ----- (4)

ρ_f : 液体の密度, g : 重力加速度, ρ_m : 媒体粒子の密度, d_m : 媒体粒子径, d_p : 微生物粒子径, v : 流速, μ : 液体の粘性係数, ρ_{bw} :

微生物膜の湿润密度

また、流動層内の物質収支より $h_0 / h \cdot (1 - \varepsilon) / (1 - \varepsilon) = (d_m / d_p)^3$ ----- (5)

ここで、 h_0 : 微生物の付着していない層の初期高さ, h : 微生物の付着した層の膨張高さ, ε_0 : 微生物の付着していない層の初期空間率, ε : 微生物の付着した層の空間率。また、 $f(\varepsilon)$ は、WenとYuにより(6)式で近似される。

$f(\varepsilon) = \varepsilon^{-4.7}$ ----- (6) 以上の(2)~(6)式より(7)式が得られ、これより ε を求め、(8)式により X を推定する。

$$\frac{d_m^3 \rho_f [\rho_m + \rho_{bw} \frac{(h(1-\varepsilon)}{h_0(1-\varepsilon_0)} - 1) - \rho_f] g / \mu^2}{18 d_m \frac{(h(1-\varepsilon)}{h_0(1-\varepsilon_0)})^{1/3} \rho_f v / \mu + 2.7 [d_m \frac{(h(1-\varepsilon)}{h_0(1-\varepsilon_0)})^{1/3} \rho_f v / \mu]^{1.687}} = \varepsilon^{-4.7}$$
 ----- (7)

$X = \rho_{bw} (1 - \varepsilon) [1 - \frac{h_0}{h} \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}]$ ----- (8)

ここで、 ρ_{bw} : 微生物膜の乾燥密度。以上が、層高さ h の測定に重点をおいた X の推定法である。次に、(2)、(6)式より(9)式が得られるが、これより空間率 ε を求めて(10)式により X を求める。

$N_{Ga} / (18 N_{Re} + 2.7 N_{Re}^{1.687}) = \varepsilon^{-4.7}$ ----- (9)

$X = \rho_{bw} (1 - \varepsilon) [1 - (d_m / d_p)^3]$ ----- (10) これが、微生物粒子径の測定に重点をおいた X の推定法である。 [2]実験方法と結果: 実験装置を図1に示す。廃水は、

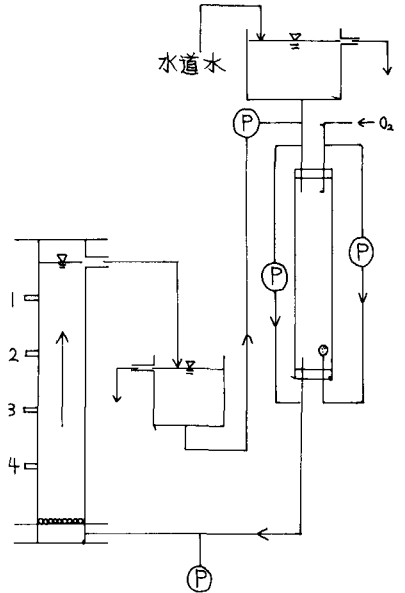


図1 実験装置

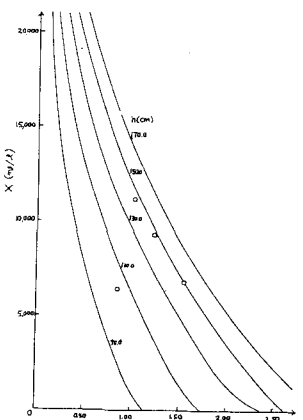


図2. h をパラメータとした X に及ぼす d_p の影響

グルコース、グルタミン酸ソーダ、酢酸アンモニウム他を含む人工廃水を用いた。p_{bw}他物性値の測定法は発表時に述べる。層高 $h=130\text{cm}$ —一定の条件下でのデータを上述2種類で解析した結果を図2・3に示す。これらから、 dp を測定して X を推定する方法では、全流動層についての dp 分布を把握することが困難で、局所的な dp を測定することになり、また形状の変化などにより精度の高い代表値を得ることが困難であるが、 h に基づく方法では、層全体の生物付着状態を全体として平均的に把握することになるので、よい結果が得られることが判明した。

3. 基質除去モデルと実験 [1]基質除去モデル：定常状態の基質除去モデルとしては、微生物の生長濃度一定として拡散項を無視、単純化した(1)式を用いる。

$$V \frac{\partial S}{\partial z} = -\frac{\mu_m S}{Y_s K_s + S} \frac{C}{K_c + C} X, \quad V \frac{\partial C}{\partial z} = -\frac{\mu_m S}{Y_c K_s + S} \frac{C}{K_c + C} X \quad (1)$$

 ここで、 S ：基質濃度、 C ：溶存酸素濃度、 V ：流速、 μ_m ：最大比増殖速度、 X ：微生物濃度、 K_s ：基質にかかわる飽和定数、 K_c ：溶存酸素にかかわる飽和定数、 Y_s ：基質にかかわる収率、 Y_c ：溶存酸素にかかわる収率。さらに、 $S^* = S/K_s$ 、 $C^* = C/K_c$ 、 $z^* = z/h$ 、 $z^* = z/h$ --- (2)として無次元化を行なうと

$$\frac{\partial S^*}{\partial z^*} = -B_s \frac{S^*}{1+S^*} \frac{C^*}{1+C^*}, \quad \frac{\partial C^*}{\partial z^*} = -B_c \frac{S^*}{1+S^*} \frac{C^*}{1+C^*} \quad (3)$$

 ここで、 $B_s = (R \mu_m / V) \cdot (X / Y_s K_s)$ 、 $B_c = (R \mu_m / V) \cdot (X / Y_c K_c)$

[2]実験結果：基質濃度はTOCとして4点で、DOは入口、出口で測定した。結果の一部は、図4に示すが、必ずしも高い精度ではないが、基質・DOの変化の傾向を示している。なお、動力学パラメータは文献によった結果、 $B_s = 0.743$ 、 $B_c = 8.18$ であった。

4. 流動層の設計法 図9の流動層システムについて設計計算のフローチャートを図10に示す。

1)データ設定： Q (目標処理流量)、 S_i (処理廃水の対象物質濃度)、 S_e (流動層での出口濃度)、 C_s (装置の性能によって決まる溶存酸素飽和濃度)、 C_e (出口溶存酸素飽和濃度)、 μ 、 q 、 d_m 、 p_m 、 p_{bw} 、 p_{bd} 、 X 、 R 、 μ_m 、 Y_s 、 Y_c 、 K_s 、 K_c が与えられるものとする。2) S_i 、 R の計算：基質除去モデルより $Y_s(S_i - S_e) = Y_c(C_i - C_e)$ --- (4) ここで、 S_i ：流動層への流入基質濃度、 C_i ：流動層への流入溶存酸素濃度。ここで、 $C_i = C_s$ とおくと $S_i = S_e + (Y_c/Y_s)(C_s - C_e)$ --- (5)

また図5より $R = (S_o - S_i)/(S_i - S_e) = q/Q$ ここで、 R ：循環比、 q ：循環流量

3) V の設定：設計因子としての流速 V を仮定する。4) $S = S(z)$ の計算：式(1)より、 $z = h$ での $S = S(h)$ を求める。5) S の適合条件： $S(h) = S_e$ でなければ、3)に再入る。6) ε の計算：式(10)より

$dp = d_m / \{1 - X/p_{bd}/(1-\varepsilon)\}^{1/3}$ --- (16) (4)、(16)式より
 $p_p = p_m \{1 - X/p_{bd}/(1-\varepsilon)\} + (p_{bw}/p_{bd}) \cdot X/(1-\varepsilon)$ --- (17)

(2)、(6)、(11)、(16)式より ε が求められる。7) ε の計算：6)において、 $dp = d_m$ 、 $X = 0$ とおく。8) dp の計算：6)で求められた ε を(16)に代入して dp は求められる。9) R_o の計算：(5)式より

$h_o = h \cdot (1-\varepsilon)/(1-\varepsilon_o) \cdot (d_m/dp)^2$ --- (18) これより求まる。

10) A の決定：断面積 A は、 $A = Q/V \cdot (1+R)$ より求まる。

11) M の決定：質量 M は、 $M = p_o A (1-\varepsilon_o) p_m$ より求まる。

以上、増長を与条件として、断面積(塔数)、充填重量を求める設計法を示した。

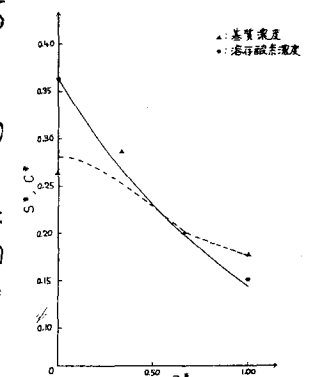
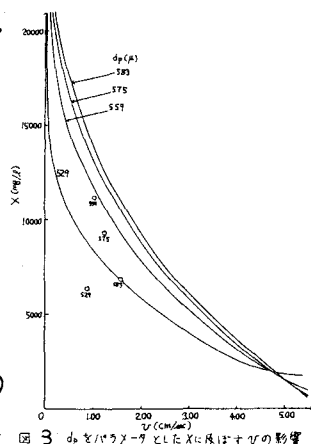


図4 S^* 、 C^* の測定分布

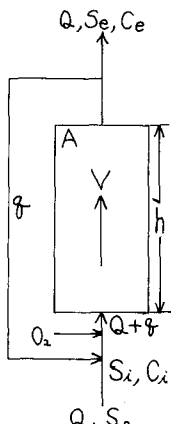


図5 概略図

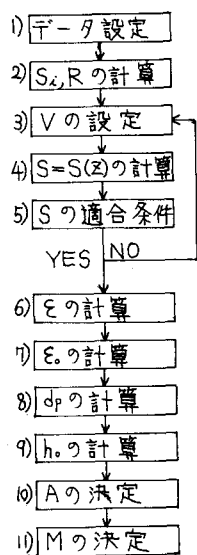


図6 フローチャート