

1. はじめに

これまで、微生物膜中の物質の拡散係数を活性汚泥を不活性化して微生物膜を作ることにより直接測定してきた。しかし、微生物膜中のリンの拡散係数を測定する場合、不活性化した微生物体中からリンの溶出があり、いままでの方法では測定することが困難となった。そこで、本研究では、不活性化した微生物体中からのリンの溶出速度などを考慮して、同じ装置を用いた実験を行ない、リンの微生物体中の拡散係数を求めたものがある。

2. 実験装置及び実験方法

図-1は、リンの拡散実験に用いた以前と同様の装置である。内部容器の容量1ℓ、外部容器の容量12ℓである。内部容器の底板中央に直径3.9cm、厚さ1mm、面積11.945cm²の拡散セルがある。拡散セルには、不活性化した活性汚泥を2枚のメンブランフィルター（直径6cm、孔径1μm）の間に入れる。外部容器内には、フィルター間の汚泥から拡散したリン濃度が常にゼロに近くなるように水道水を通水している。

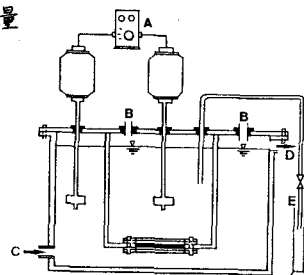


図-1 実験装置

本研究に用いた活性汚泥は、M処理場の返送汚泥を、毎日1回の fill and draw により馴養を行なったものである。表-1は、リン酸拡散実験に用いた活性汚泥の馴養に用いた人工下水組成である。微生物膜形成は、不活性化した汚泥を遠心分離後、メンブランフィルター上に吸引し、生物膜とした。リン酸の拡散実験は、蒸留水を入れた内部容器にフィルター間の微生物膜から拡散してくるリン酸の濃度を測定することにより行なった。また、不活性化した活性汚泥からのリン酸の溶出実験においては、三角フラスコ内に不活性化した活性汚泥を入れ、蒸留水を加え一定量とし溶出してくるリン酸の濃度を測定することにより行なった。不活性化は、HgCl₂ 500 mg/l の溶液を用い、リン酸の分析は、モリブデン青法により行なった。また、これらの実験は共に、8±2℃で行なった。

	Concentration mg/l	
C ₆ H ₁₂ O ₆	600	240 as C
NH ₄ Cl	200	53 as N
Na ₂ HPO ₄	15	7 as P
KH ₂ PO ₄	15	
CaCl ₂ ·2H ₂ O	15	4 as Ca
KCl	15	8 as K
MgSO ₄ ·7H ₂ O	15	1 as Mg
FeCl ₃ ·6H ₂ O	15	4 as Fe
C/N	5	

3. 微生物膜中のリン酸の拡散係数の求め方

図-2に実験に用いた微生物膜のモデルを示す。リン酸は、微生物膜中(Ⅱ)相)で溶出し、ⅠとⅢの filter を通して、下部容器と上部容器へ拡散していくものとする。それぞれの層における拡散方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} + r_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 C_3}{\partial z^2} \quad (3)$$

ここに、C₁、C₂、C₃は、それぞれの層内におけるリン酸の濃度(mg/l)、D₁、D₂は、それぞれ、メンブランフィルターおよび微生物膜中のリン酸の拡散係数(cm²/sec) r_pは、不活性化された微生物膜から溶出するリン酸の速度(mg/l·hr)である。

また、式(1)~(3)の連立偏微分方程式を解く場合に必要の初期条件および境界条件は、微生物膜の厚さを2L、フィルターの厚さをδとして次のように与えられる。

$$t=0 \quad z=z \quad C_1=0, C_2=0, C_3=0 \quad (4)$$

$$t=t \quad z=L+\delta \quad C_1=0 \quad (5)$$

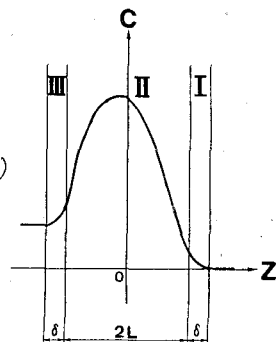


図-2 微生物膜モデル

$$t=t \quad Z=L \quad C_1=C_2 \quad \text{および} \quad D_r \frac{\partial C_1}{\partial Z} = D_M \frac{\partial C_2}{\partial Z} \quad (6)$$

$$t=t \quad Z=-L \quad C_2=C_3 \quad \text{および} \quad D_M \frac{\partial C_2}{\partial Z} = D_r \frac{\partial C_3}{\partial Z} \quad (7)$$

$$t=t \quad Z=-(L+\delta) \quad \frac{\partial C_3}{\partial Z} = 0 \quad (8)$$

となる。そこで、これらの初期条件および境界条件を用いて、(1)~(3)式の explicit に差分化された式から数値的に解を求めた。その結果から、上部容器内へのリン酸の拡散量と実験により求め、計算結果より得られる拡散量と出来るだけ一致するように、微生物膜中のリン酸の拡散係数 (D_M) を trial and error で見出すことにより、リン酸の拡散係数を求めた。なお、filter 内のリン酸の拡散係数は、今まで種々な物質の微生物膜中の拡散係数を求めたと同様な方法により、得られており、その値は $2.11 \times 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ となっている。また、差分化に必要な格子間隔 ΔZ は 10μ 、時間ステップは $0.1/\text{sec}$ としている。

4. 不活性化された活性汚泥からのリン酸の溶出速度

式(2)に含まれるリン酸の溶出速度 (r_p) は実験的に求める必要がある。そこで、実験方法の項で述べたような方法で得られた三角フラスコ中のリン酸の濃度の一例を図-3に示す。このときの MLSS は 1344 mg/g である。このときのリン酸の濃度は、Line weaver-Burk プロットにより関数型と求めると次式のようになる。

$$C = \frac{40.42t}{3.72+t} \quad (9) \quad \text{ここに、} C \text{ はフラスコ内のリン酸の濃度である。}$$

そこで、式(9)をもとに微分することにより、リン酸の溶出速度と求めると次式のようになる。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{150.36}{(3.72+t)^2} \quad (10)$$

式(10)を三角フラスコ内の MLSS で割ることにより、リン酸の比溶出速度が求められる。その比溶出速度とその時刻における溶液中のリン酸濃度の関係プロットしたものが図-4であり、それらの関係は、図中に示した式 $Y = 1.29 \times 10^{-2} \exp(-9.33 \times 10^{-2} C)$ (11) によって与えられる。ここに Y はリン酸の比溶出速度である。したがって r_p は次式のようになる。 $r_p = 1.29 \times 10^{-2} M \exp(-9.33 \times 10^{-2} C_2)$ (12) ここに M は微生物膜の密度 (mg/g)、 C_2 は微生物膜内のリン酸濃度 (mg/g) である。

5. 微生物膜内のリン酸の拡散係数

図-5に示したように、上部容器内へのリン酸の拡散量は、微生物膜内の拡散係数が $1.02 \times 10^{-7} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ のとき最も実験値と一致した。したがって、リン酸の微生物膜内の拡散係数は、水中の拡散係数が $1.02 \times 10^{-5} \text{ (100}^\circ\text{C)}$ であるので、2オーダー小さくなった。グルコースや酸素の場合、水中の拡散係数に較べて1オーダー程度の減少となるが、リン酸の場合、それ以上となった。これは、リン酸の微生物膜内の吸着等の効果により、かなり拡散速度が遅れてくるのが原因と考えられる。また、微生物膜の性状による拡散係数の変化についての研究は、今後の課題となっている。

参考文献 1) ONUMA ET AL.: BIOTECHNOLOGY AND BIOENGINEERING, VOL. 27, Pp. 1533-1539 (1985)

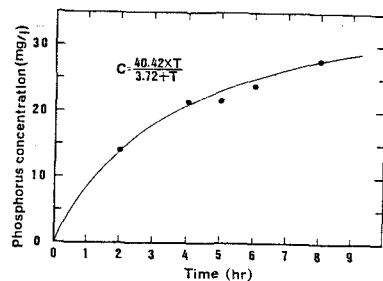


図-3 三角フラスコ内のリン酸濃度

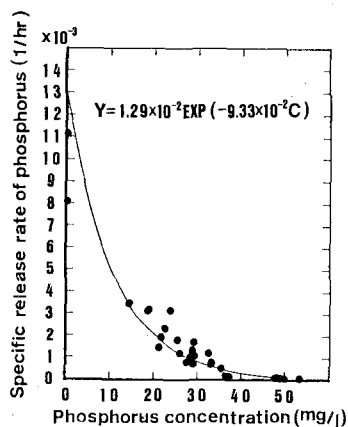


図-4 リン酸濃度と比溶出速度の関係

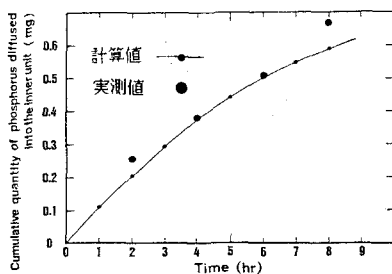


図-5 上部容器へのリン酸の拡散量