

半水没型回転円板付着生物膜内基質濃度と膜の動的変化のシミュレーション

国立鹿児島高専 ○西留 清
九州大学工学部 楠田哲也
宮崎大学工学部 渡辺義公

1. はじめに

半水没型回転円板の付着生物を形成する細菌の濃度分布は、空中部酸素分圧、液本体のDO、基質(有機物、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)、pH、温度等により決められる^{1,2)}。逆に、液本体および付着生物膜内の基質濃度は、付着生物を形成する細菌の濃度分布の影響を受ける。この様に液本体基質濃度および付着生物膜内の基質濃度と付着生物を形成する細菌濃度とは相互に作用を及ぼしあっている。そこで、本論文では、半水没型回転円板付着生物膜の代謝活性と内部菌種分布の関係を明らかにするため、液本体基質濃度が異なる場合に主眼をおいてシミュレーションを行ない、①生物膜の形成速度、②膜内部の菌種分布、③基質除去速度、④膜内部の基質濃度分布について検討を行う。

2. 回転円板付着生物膜増殖過程のシミュレーション^{3,4,5,6)}

半水没型回転円板支持体に付着している生物膜は、つぎの過程をへて形成されると考えられる。①有機物酸化細菌および硝化細菌等を含む液本体のSSが円板支持体に付着し、支持体表面に薄い膜を形成する。

②この膜表面にさらに液本体のSSが付着し、主に空中部で酸素が、水中部で基質が膜中に拡散し、膜中の生物は増殖・死滅・分解する。③生物膜は付着増殖しつつ一部は剥離する。

2-1. 仮定

①生物膜中での酸素、基質の分子拡散係数(D_b)は次式で表せる。

$$D_b/D_w = (1 - \text{TBMAX})^2 \quad (1)$$

TBMAX:生物膜中における単位体積当たりの付着物の割合 (g/g) (付着生物膜を3000rpm, 20分間の遠心分離にかけた後の総量に占める付着物の体積の割合)

②生物増殖・死滅の基礎式は式-2~4で表される。

$$\frac{dX_c}{dt} = X_c \left(\mu_{cm} \frac{C_c}{K_c + C_c} \frac{O_c}{K_{oc} + O_c} \right) - X_c \cdot C_d \quad (2)$$

$$\frac{dX_n}{dt} = X_n \left(\mu_{nm} \frac{N_c}{K_n + N_c} \frac{O_c}{K_{on} + O_c} \right) - X_n \cdot N_d \quad (3)$$

$$\frac{dX_d}{dt} = X_d \left(\mu_{dm} \frac{D_c}{K_d + D_c} \frac{C_c}{K_{cd} + C_c} \frac{K_{od}}{K_{od} + O_c} \right) - X_d \cdot D_d \quad (4)$$

X_c : 活性有機物酸化細菌濃度(mg/l), X_n : 活性硝化菌濃度(mg/l), X_d : 活性脱窒菌濃度(mg/l), t : 時間(day), μ_{cm} : 有機物酸化細菌最大比増殖速度(day^{-1}), μ_{nm} : 硝化菌最大比増殖速度(day^{-1}), μ_{dm} : 脱窒菌最大比増殖速度(day^{-1}), C_c : 有機物濃度(mg/l), N_c : $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度(mg/l), D_c : $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(mg/l), O_c : DO濃度(mg/l), K_c : 有機物の飽和定数(mg/l), K_n : $\text{NH}_4\text{-N}$ の飽和定数(mg/l), K_d : 脱窒反応における $\text{NO}_3\text{-N}$ の飽和定数(mg/l), K_{oc} : 有機物酸化におけるDOの飽和定数(mg/l), K_{on} : 硝化におけるDOの飽和定数(mg/l), K_{od} : 脱窒における有機物の飽和定数(mg/l), K_{cd} : 脱窒におけるDOの飽和定数(mg/l), C_d : 有機物酸化細菌死滅速度(day^{-1}), N_d : 硝化菌死滅速度(day^{-1}), D_d : 脱窒菌死滅速度(day^{-1}).

③死滅菌体の増加・分解は次式により表される。

$$\frac{dX_{dc}}{dt} = X_c \cdot C_d - X_{dc} \cdot C_{dc} \quad (5)$$

$$\frac{dX_{dn}}{dt} = X_n \cdot N_d - X_{dn} \cdot C_{dn} \quad (6)$$

$$\frac{dX_{dd}}{dt} = X_d \cdot D_d - X_{dd} \cdot C_{dd} \quad (7)$$

X_{dc} : 死滅有機物酸化細菌濃度(mg/l), X_{dn} : 死滅硝化菌濃度(mg/l), X_{dd} : 死滅脱窒菌濃度(mg/l), C_{dc} : 有機物酸化細菌死滅速度(day^{-1}), C_{dn} : 硝化菌死滅速度(day^{-1}), C_{dd} : 脱窒菌死滅速度(day^{-1}).

④生物膜厚の増加は次式により表される。

$$\frac{dZ_o}{dt} = \frac{1}{X_{zo}} \frac{dX_c}{dt} + \frac{1}{X_{zn}} \frac{dX_n}{dt} + \frac{1}{X_{zd}} \frac{dX_d}{dt} - \frac{1}{X_{zo}} \frac{dX_{dc}}{dt} - \frac{1}{X_{zn}} \frac{dX_{dn}}{dt} - \frac{1}{X_{zd}} \frac{dX_{dd}}{dt} \quad (8)$$

Z_o : 生物膜厚(μm), X_{zo} : 有機物酸化細菌が単位体積を占める菌体量($\text{mg/l}/\mu\text{m}$), X_{zn} : 硝化菌が単位体積を占める菌体量($\text{mg/l}/\mu\text{m}$), X_{zd} : 脱窒菌が単位体積を占める菌体量($\text{mg/l}/\mu\text{m}$).

その他の仮定については参考文献(6, 7)を参照されたい。

2-2. 計算方法^{8, 7)} 計算方法については参考文献(6, 7)を参照されたい。

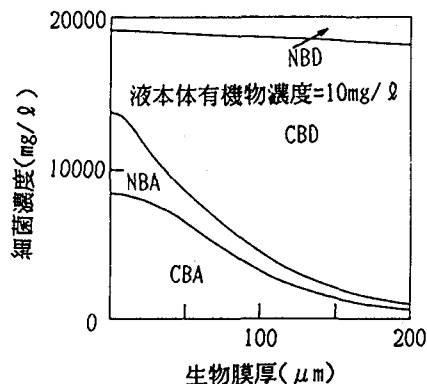
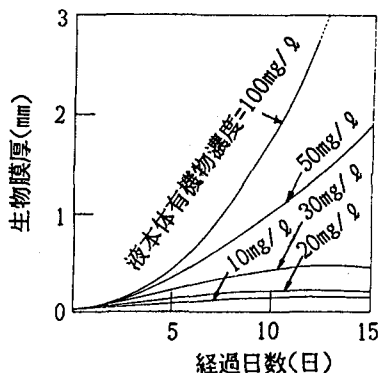
3. シミュレーション結果と考察

以下に示すシミュレーション結果は液本体有機物濃度を100, 50, 30, 20, 10mg/ℓと変化させ、液本体 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度(10mg/ℓ), $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(1mg/ℓ), DO 濃度(1mg/ℓ), 初期付着有機物酸化細菌および硝化細菌濃度(1000mg/ℓ)を一定として求められたものである。なお、生物膜の剝離はある生物膜が最大分割数(100, 2~4mm)になったら生物膜の表面から生じるものとしている。

3-1 生物膜の形成速度

図-1は生物膜の厚さと経過日数の関係である。液本体有機物濃度が高いほど有機物酸化細菌の増殖速度が大きいため、生物膜の形成速度は速くなる。液本体有機物濃度が50mg/ℓ以上では、10日目以降も形成速度は増加しているが、

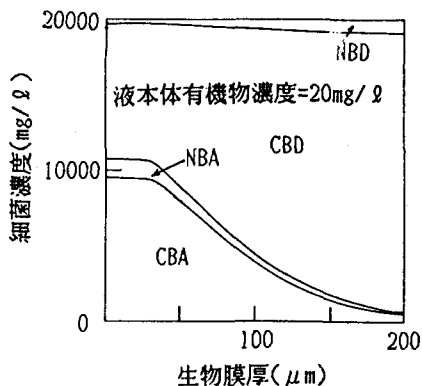
液本体有機物濃度が30mg/ℓ以下になると、10日目以降は生物膜内部の生物の増殖速度が死滅菌の分解速度にほぼ等しくなるため、膜厚さはさほど増加しない。さらに、経過すると増殖速度が死滅菌の分解速度より遅くなり、生物膜厚さは若干薄くなる。



3-2 生物膜内部の菌種分布

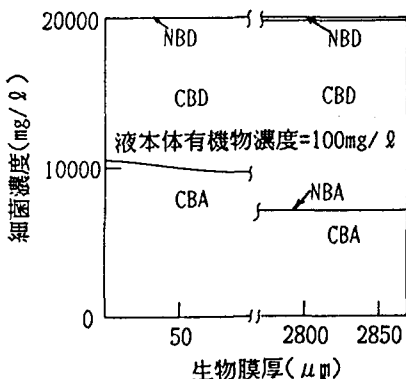
図-1 生物膜厚さと経過日数

図-2は13日目における生物膜内部の菌種分布である。液本体有機物濃度が10mg/ℓでは、生物膜表面近傍に活性を持つ有機物酸化細菌(CBA)と硝化菌(NBA)が高濃度で存在する。しかし、液本体有機物濃度が高くなるほど生物膜表面近傍の活性を持つ硝化菌濃度は小さくなる。液本体有機物濃度が100mg/ℓでは、生物膜表面近傍に硝化菌は殆ど存在せず、生物膜深部に低濃度で存在するだけである。液本体有機物濃度が100mg/ℓでは12日目以降になると、生物膜は最大分割数(100, 2~4mm, 平均約3mm)以上になり、活性を持つ生物膜表面近傍の最大分割数以上の有機物酸化細菌が剝離を繰り返す。このため、生物膜表面近傍の有機物酸化細菌濃度は液本体有機物濃度が50mg/ℓより100mg/ℓの場合が低くなっている。



3-3 基質除去速度

図-3は液本体有機物濃度が100と10mg/ℓにおける生物膜への酸素、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および有機物のFluxと経過日数の関係である。約2日目後における有機物酸化と硝化は、本計算条件では生物反応が酸素輸送律速下にあるため酸素Fluxは液本体有機物濃度が100と10mg/ℓでは殆ど変わらない。 $\text{NH}_4\text{-N}$ と有機物は、硝化と有機物の酸化および生物の形成により除去される。このため生物膜の形成速度の大きい液本体有機物濃度が100mg/ℓの場合、有機物のFluxは高くなる。液本体有機物濃度が10mg/ℓにおいては、硝化に起因する $\text{NH}_4\text{-N}$ の除去は多いが、液本体有機物濃度が100mg/ℓにおいては、有機物酸化細菌の形成に起因する $\text{NH}_4\text{-N}$ の除去が非常に多いため、液本体有機物濃度が100mg/ℓの場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ のFluxも高くなる。



3-4 生物膜内部の基質濃度分布

図-4は液本体有機物濃度が100と10mg/ℓにおける生物膜内の基質(酸素、有機物、 $\text{NH}_4\text{-N}$)濃度分布である。液本体有機物濃度が100mg/ℓ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度10mg/ℓの場合、生物膜表面近傍に $\text{NH}_4\text{-N}$ が殆ど存在しないため、有機物酸化細菌の増殖が $\text{NH}_4\text{-N}$ 輸送律速であると考えられる。図-5は液本体有機物濃度が10mg/ℓにおける生物膜内の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度分布である。本図中の NO_x と NO_y はそれぞれ水中に入る寸前と空中に出る寸前の生物膜中での $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

図-2 生物膜内部の菌種分布(13日目)

CBA: 活性有機物酸化細菌
CBA: 活性硝化菌
CBD: 死滅有機物酸化細菌
CBD: 死滅硝化菌

分布であり、付着生物膜が一回転する間に脱窒が起こらず、硝化と $\text{NO}_3\text{-N}$ の拡散のみが生じた場合のものであり、DXとDYはそれぞれ水中に入る寸前と空中に出る寸前の生物膜中での硝化・ $\text{NO}_3\text{-N}$ 拡散と脱窒が起こった場合のものである。したがって、DYとNOXの差は生物膜が空中部を回転する間に起こった硝化と $\text{NO}_3\text{-N}$ の拡散であり、NOXとDXの差は空中部生物膜内における $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱窒・拡散である。

また、NOXからNOY迄は水中部の生物膜内で生じた硝化と $\text{NO}_3\text{-N}$ の拡散の結果であり、NOXとDYの差は水中部生物膜における $\text{NO}_3\text{-N}$ の脱窒・拡散の結果である。本計算条件のもとでは、脱窒速度は遅いが、比較的高濃度の酸素が存在しても脱窒が生ずる(式-4)と計算されているため、生物膜表面近傍でも脱窒が生じている。生物膜深部では酸素濃度は低い、有機物濃度が低いため脱窒は殆ど生じていない。

4. おわりに

本研究では、未だ完全に解明されていない付着生物膜の構造を明らかにする一助として、非定常半水没型回転円板付着生物の増殖、死滅、および分解を考慮した生物膜モデルにより半水没型回転円板付着生物膜の動的変化と内部における物質の濃度分布をシミュレーションにより求めた。そして、その結果以下のことが明らかとなった。①液本体有機物濃度が高いほど生物膜の形成速度は速くなる。②増殖速度が死滅菌の分解速度より遅くなると生物膜厚さは若干薄くなる。③液本体有機物濃度が高くなるほど生物膜表面近傍の活性を持つ硝化菌濃度は小くなる。④ $\text{NH}_4\text{-N}$ と有機物のFluxは液本体有機物濃度が高くなるほど(液本体 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度=10mg/l)は大きい。⑤高酸素濃度の存在する生物膜表面近傍でも脱窒が生じる。

本研究を遂行するに当たり、本校の榎並利征文部技官ならびに中原和範文部技官に多大な御協力を頂きました。ここに、感謝申し上げます。尚、本研究の一部は平成3年度文部省科学研究費(一般研究C、研究代表者:西留清)の助成を受けて遂行されたことを記す。

参考文献

- (1) 増田純雄, 渡辺義公, 石黒政儀: 回転円板付着生物膜内の細菌に関する研究, 下水道協会誌, Vol. 24, No. 278, pp. 19-31, 1987(7).
- (2) 西留清, 渡辺義公: 回転円板法による下水処理水の固液分離に関する研究, 鹿児島工業高等専門学校研究報告21号, pp. 93-102, 1987. (3) Characklis and Marshall: Biofilms, Wiley 1990 July ISBN, pp. 255-264. (4) John C. Kissel: Numerical Simulation of Mixed-Culture Biofilm, Journal of Environmental Engineering, Vol. 110, No. 2, April, 1984. (5) O. Wanner and W. Gujer: A Multispecies Biofilm Model, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 28, March, 1986. (6) Nishidome K. and Kusuda T.: Mechanism and Simulation of Biofilm Formation in a Rotating Biological Contactor, International Symposium ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY 22-25 April, 1991, Ostend, Belgium. (7) 西留清, 楠田哲也, 他: 半水没型回転円板付着生物膜の動的変化のシミュレーション, 第6回生物膜法研究シンポジウム, 1991(11).

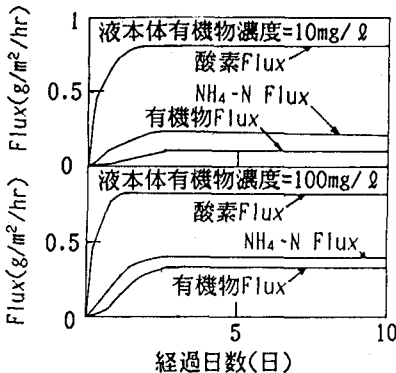


図-3 生物膜への酸素, $\text{NH}_4\text{-N}$ および有機物Flux

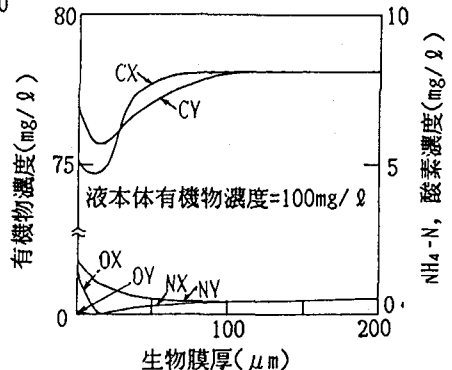
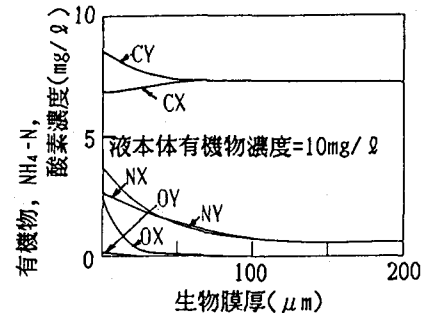


図-4 生物膜内の基質濃度分布

OX: 水中に入る寸前の酸素
OY: 空中に出る寸前の酸素
CX: 水中に入る寸前の有機物
CY: 空中に出る寸前の有機物
NX: 水中に入る寸前の $\text{NH}_4\text{-N}$
NY: 空中に出る寸前の $\text{NH}_4\text{-N}$

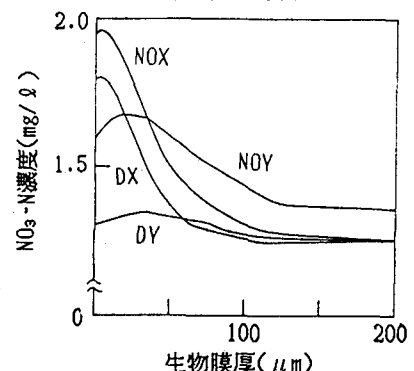


図-5 生物膜内の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度分布

NOX: 水中に入る寸前の硝化 $\text{NO}_3\text{-N}$
NOY: 空中に出る寸前の硝化 $\text{NO}_3\text{-N}$
DX: 水中に入る寸前の硝化・脱窒 $\text{NO}_3\text{-N}$
DY: 空中に出る寸前の硝化・脱窒 $\text{NO}_3\text{-N}$