II-389　回転円板法における硝化・脱窒・有機物酸化過程のシミュレーション

宮崎大学工学部　　正員　増田純雄　正員　渡辺義公　正員　石黒政儀

1．はじめに　　回転円板法では単一生物膜内で硝化、脱窒、有機物酸化反応の３つが同時に起る現象が存在する。前年講ではこの反応機構を解明するために、予備的なシミュレーションを行い、生物膜内には通性嫌気性ゾーン、絶対好気性および嫌気性ゾーンが形成されることを報告した[1]。この通性嫌気性ゾーン内に酸素が存在する場合には好気性および通性嫌気性の他栄養細菌、アンモニア酸化細菌により有機物,NH_4-Nの酸化、酸素が完全に消費されると同時に通性嫌気性細菌により脱窒が行われる。筆者らは付着生物膜内には各種の細菌が混在し、細菌密度は通性嫌気性細菌がほぼ一定で、硝化細菌は生物膜深さ方向に増加、他栄養細菌は減少することを報告した[2]。本文では生物膜内の硝化細菌が生物膜深さ方向に増加、他栄養細菌は減少の傾向を示すため、付着生物膜内の硝化、有機物酸化反応速度は飽和関数に近似できるとし、硝化、脱窒、有機物酸化過程のシミュレーションを行いその結果と実験で得られたデータと照合した結果について報告する。

2．数値計算　　シミュレーションモデルは渡辺らのモデルに準拠し[3]、以下のように仮定した。①通性嫌気性ゾーン内にDO,NH_4-N,NO_3-N,CH_3OHが共存する場合にはNH_4－N,CH_3OH酸化が同時に起り、DOが消費されると瞬時に通性嫌気性細菌が脱窒を行う。②好気および通性嫌気性生物膜内での硝化反応によるNH_4－N とCH_3OH酸化反応によるCH_3OH の消滅および脱窒反応によるNO_3－Nの消滅を表わす反応項を加えた。シミュレーションのための定数値は渡辺らの報告した値[3]を用い、実験条件の30°Cに補正した各定数値を表－１に示す。

3．硝化・脱窒・有機物酸化過程の生物膜モデル　　筆者らは回転円板付着生物膜内の細菌濃度分布を調べるため、マイクロスライサーで生物膜をスライス状にCutting し、生物膜深さ方向の細菌濃度分布を測定した[2]。その結果、生物膜内の細菌密度は通性嫌気性細菌が深さ方向にほぼ一定で、硝化細菌は生物膜の深さ方向に増加、他栄養細菌は減少する傾向を示し、付着生物膜内には各種の細菌が混在することが判明した。したがって、生物膜内の硝化、脱窒、有機物酸化反応は膜内の環境条件(DO,NH_4-N,NO_3-N,有機物の有無）によっていずれの場所においても十分起り得ると考えられる。生物膜内の任意深さでの酸素摂取速度は常に一定で、有機物酸化と硝化に使われる酸素消費速度の和が等しいと仮定し、生物膜内の硝化、有機物酸化反応速度(Rn,Rm）が飽和関数で近似できるとすると次式のようになる。

$$Rn/Rn^{*} = (Z-Zo)/(Kn+(Z-Zo)) \qquad Z>Zo \quad \text{-----(1)}$$

$$Rm/Rm^{*} = Kn/(Kn+(Z-Zo)) \qquad Z>Zo \quad \text{-----(2)}$$

有機物負荷が高い場合には生物膜表面は他栄養細菌の増殖、剥離が活発となるため、硝化、有機物酸化反応速度は次式のようになる。

$$Rn/Rn^{*} = \alpha \qquad Rm/Rm^{*} = 1-\alpha \qquad 0 \leq Z \leq Zo \quad \text{---(3)}$$

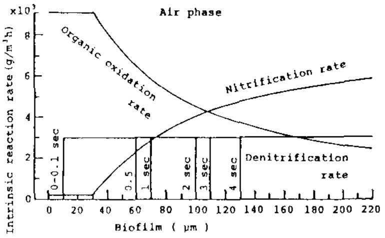
脱窒速度(Rd)は生物膜深さ方向に一定で、NO_3－Nと有機物の存在下では生物膜内の酸素が完全に消費されると同時に脱窒が生じる。

$$Rd = Rd^{*} \qquad Rm = 2.5Rd \quad \text{-------------(4)}$$

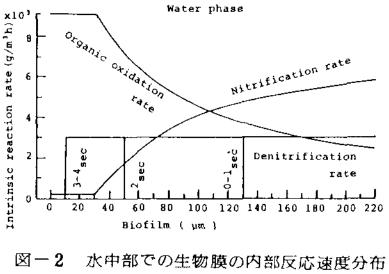
ここで,Rn^{*},Rd^{*},Rm^{*} は最大硝化、脱窒、有機物酸化速度(g/m³h)、Kn,Zoは定数(m),Zは生物膜厚(m),αは有機物負荷によって決る定

表－１　Simulation の諸定数値 (30°C)

Biofilm thickness	900 μm
Attached-water layer thickness	50 μm
Diffusion layer thickness	70 μm
Intrinsic nitrification rate	8000 g/m³h
Intrinsic denitrification rate	3000 g/m³h
Intrinsic methanol oxidation rate	9000 g/m³h
Diffusion coefficient of ammonia	9.0×10^{-6} m²/h
Diffusion coefficient of oxygen	10.4×10^{-6} m²/h
Diffusion coefficient of methanol	7.6×10^{-6} m²/h
Diffusion coefficient of nitrate	7.9×10^{-6} m²/h
Disk rotating speed	7.5 rpm



図－１　空中部での生物膜の内部反応速度分布

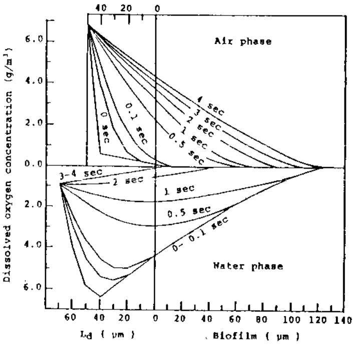


図－２　水中部での生物膜の内部反応速度分布

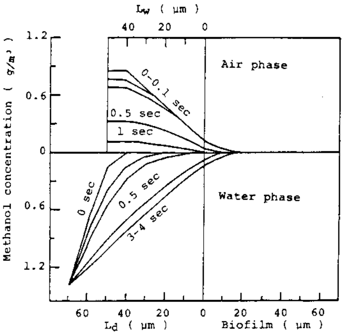
表－２　Simulation に用いた実験データ

	P_O (atm)	NH_4-N (g/m³)	NO_3-N (g/m³)	CH_3OH (g/m³)	DO (g/m³)
Run 1	0.21	0.5	22.0	1.3	1.0
Run 2	0.18	0.5	13.7	1.3	0.9
Run 3	0.11	7.0	0.2	8.5	0.1
Run 4	0.08	20.0	0.1	56.0	0.1

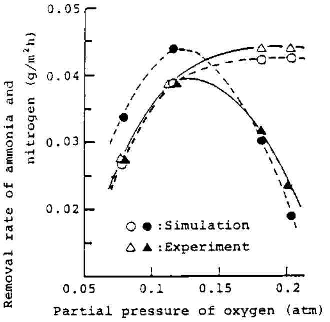
数である。表－１のシミュレーションの諸定数値を用い、(1)～(4)式を図示したのが図１，２である。図は生物膜内の空中、水中での硝化、脱窒、有機物酸化反応速度分布である。



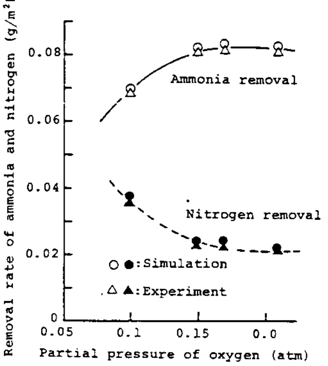
図－３生物膜内のDO 濃度分布



図－４生物膜内のMethanol濃度分布



図－５ NH$_4$-N 窒素除去速度と気相酸素分圧の関係



図－６ NH$_4$-N 窒素除去速度と気相酸素分圧の関係

４．結果と考察　表－１の諸定数値と表－２の実験データを用いたシミュレーションの結果を図３～６に示す。図－３は表－２のRun2の場合の生物膜内DO濃度分布である。円板が水中から空中に出た瞬間、DOは生物膜厚10μmまで浸入しているが、4秒後には最大酸素浸入深さ(120μm)に達する。逆に、円板が空中から水中に入った瞬間、DOは120μmまで浸入しているが、３秒後には生物膜厚10μmまで浸入深さが浅くなる。したがって、空中、水中部とも120μm程度が間欠的に酸素が浸入する通性嫌気性ゾーン、生物膜120μm以上が絶対嫌気性ゾーン、生物膜表層部10μm程度が絶対好気性ゾーンとなる。図－４は生物膜内のCH_3OH 濃度分布である。液本体CH_3OH 濃度が低く生物膜表層部の有機物酸化反応速度が大きいため、CH_3OHは生物膜表層部でほとんど消費され最大CH_3OH浸入深さは20μmとなる。この場合の脱窒反応は生物膜深さ10~20μmの間で生じる。図－５にNH_4-N,窒素除去速度と気相酸素分圧の関係を示す。この場合の条件はNH_4-N負荷1g/m²d，CH_3OH 負荷10g/m²dであり、生物膜表面の他栄養細菌の増殖、剥離が活発となるため,定数値α(0.026)は実測データのNH_4－N除去速度に合うようにTry and error で求めた。本文では液本体から生物膜内に移動したNH_4-N Fluxと生物膜内から液本体へ移動したNO_3-N Fluxの差を窒素除去速度と定義する。図中の白黒丸印が計算結果で、白黒三角印が実験で得られた窒素除去速度である。図から明らかなように、NH_4－N除去速度は実験値と計算結果が良く一致しているが、酸素分圧の低い所(0.08、0.11 atm)では計算値が高くなる。これは酸素分圧の低下に伴い液本体のCH_3OH 濃度が高くなると共に、CH_3OH 酸化量が増加し細胞合成に利用される窒素量が大きくなるためである。図－６にNH_4－N負荷1g/m²d、CH_3OH負荷3.5g/m²dでのNH_4-N、窒素除去速度と気相酸素分圧の関係を示す。この場合、有機物負荷が低いため定数値αは零とした。すなわち、生物膜表面の他栄養細菌の増殖、剥離が図－５に比べて少ないため、生物膜表面から硝化、有機物酸化速度が飽和関数で近似できるとした。図から、NH_4-N 、窒素除去速度が実験値と計算結果が良く一致することが判明した。

５．おわりに　付着生物膜内の硝化、有機物酸化反応速度を飽和関数とおき、数値計算を行った結果、実験で得られた硝化、脱窒パターンを再現できた。したがって、生物膜内の脱窒速度が生物膜深さ方向に一定で、硝化速度は生物膜表面から深さ方向に漸次増大、有機物酸化速度は生物膜表面で最大で深さ方向に漸次減少する関数形を導入することによって、硝化、脱窒、有機物酸化過程の理論解析が可能となる。なお、本研究は鹿島学術振興財団の助成金により遂行されたことを付記し関係各位に謝意を表する。

参考文献

1)増田,渡辺,石黒：生物膜内での硝化、脱窒反応機構について　土木学会第38回年講　1983
2)小湊,増田,石黒：生物膜内の細菌分布について　土木学会西部支部講演集　1984.2
3)渡辺,石黒,西留：回転円板法による硝化過程のシミュレーション　下水道協会誌　Vol.19.No223