

京大・工 正員 寺島 泰  
 京大・工 正員 尾崎 博明  
 京大・工 ○陳 光浩

1.はじめに 生物膜においては、有機物の酸化反応と窒素の硝化・脱窒反応が同時に生じ、また各種物質の膜内外における輸送が関与するため、非常に複雑な系となっている。本研究では、膜内外における有機物、窒素化合物、酸素、アルカリ度の輸送、及び膜内におけるそれら物質の挙動を記述する総合的な生物膜反応モデルを提示するとともに、一部実験的な検討を行った。

2.生物膜反応モデル 生物膜における有機物の酸化、

表-1 生物膜反応動力学モデル

$$D_{fs} \frac{d^2 S_f}{dz^2} = \frac{K_{ms} S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} X_f + \beta \frac{K_{mc3} C_{2f}}{K_{c2} + C_{2f}} \cdot \frac{S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{K_{or}}{K_{or} + C_f} X_f - K_{nb} = \rho + (1-f) X_f \quad (1)$$

$$D_{fc} \frac{d^2 C_f}{dz^2} = r_2 \frac{K_{ms} S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} X_f + r_n \frac{K_{mc2} C_{1f}}{K_{c1} + C_{1f}} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot \frac{A_f}{K_f + A_f} X_f \quad (2)$$

$$D_{fc1} \frac{d^2 C_{1f}}{dz^2} = (1-Y_2 + F_N) \frac{K_{mc2} C_{1f}}{K_{c1} + C_{1f}} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot \frac{A_f}{K_f + A_f} X_f - K_r + F_N + b^* (1-f) X_f + Y_1 F_N \frac{K_{ms} S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} X_f \quad (3)$$

$$D_{fc2} \frac{d^2 C_{2f}}{dz^2} = \frac{K_{mc3} C_{2f}}{K_{c2} + C_{2f}} \cdot \frac{S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{K_{or}}{K_{or} + C_f} X_f - \frac{K_{mc2} C_{1f}}{K_{c1} + C_{1f}} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot \frac{A_f}{K_f + A_f} X_f \quad (4)$$

$$D_{fa} \frac{d^2 A_f}{dz^2} = (\omega + \sigma + Y_2 + F_N) \frac{K_{mc2} C_{1f}}{K_{c1} + C_{1f}} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot \frac{A_f}{K_f + A_f} X_f + \sigma + Y_1 + F_N \frac{K_{ms} S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} X_f - \theta (1-Y + F_N) \frac{K_{mc3} C_{2f}}{K_{c2} + C_{2f}} \cdot \frac{S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{K_{or}}{K_{or} + C_f} X_f - \sigma + K_r + F_N + b^* (1-f) X_f \quad (5)$$

$$J_{sb} = \frac{D_{ws}}{L} (S_b - S_s) \quad (6) \quad J_{cb} = \frac{D_{wc}}{L} (C_b - C_s) \quad (7) \quad J_{cb1} = \frac{D_{wc1}}{L} (C_{1b} - C_{1s}) \quad (8)$$

$$J_{cb2} = \frac{D_{wc2}}{L} (C_{2b} - C_{2s}) \quad (9) \quad J_{ab} = \frac{D_{wa}}{L} (A_b - A_s) \quad (10)$$

膜における有機物の酸化、硝化・脱窒反応に関する水質項目としてCODcr, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N, アルカリ度の5項目をとりあげ、定常状態下におけるそれらの膜内における輸送と反応動力学式とをあわせて物質収支式をそれぞれ表-1の(1)~(5)式で表わした。これらの式において各水質項目の反応は、基本的にはそれに関与する他の水質項目とのMonod型の複合動力学式で表わせ

るとした。ここで、死滅した微生物はLysis 酵素が寄与する分解反応(以下Lysis 反応とよぶ)により、零次反応に従い二次基質を生成するものとし、これに関する詳細については別の機会に報告する。

3.モデルのシミュレーション結果及び考察 本モデルの解析は、膜の底面における各水質項目のフラックスが零であると仮定し、表-1の各式を非線形常微分方程式の多点境界値問題に関する初期値修正法により解き、拡散層の液相側の境界から生物膜の支持体までの各水質項目の濃度分布及びこれらのフラックスの変化を計算した。計算に用いた諸定数値を表-2に示す。ここで、NO<sub>x</sub>-Nに関する液相と膜内での拡散係数はNO<sub>2</sub>-NとNO<sub>3</sub>-Nのそれらを平均した。また、アルカリ度はおもに重炭酸イオンと炭酸イオンからなるとし、それらの拡散係数を平均してアルカリ度の拡散係数とした。ただし、膜内でのアルカリ度の拡散係数は液相中のその80%に相当したと仮定した。

図-1は一般的な条件での各水質項目の膜内分布を計算した例である。ここではLysis 反応による二次基質の生成は考慮していない。COD等の各水質項目の濃度は膜の深さ方向に減少し、NO<sub>x</sub>-N濃度についてもDO濃度の低下とともに脱窒反応により減少する様子がみられる。これら水質項目の挙動は予測される傾向と矛盾せず、本モデルは構造的に十分妥当であると考えられる。Lysis 反応による二次基質の生成を考慮した場合について計算した各水質項目の濃度分布を図-2に示す。液相中の有機物濃度が低い場合については、とく

表-2 諸定数表

項目	値	項目	値
D <sub>ws</sub>	0.8	K <sub>c2</sub>	0.0001
D <sub>wc</sub>	1.8	X <sub>f</sub>	30.0
D <sub>wc1</sub>	1.5	K <sub>f</sub>	1.0
D <sub>wc2</sub>	1.4	X	0.45
D <sub>wa</sub>	0.942	b	
D <sub>fs</sub>	0.44	p	1.42
D <sub>fc</sub>	1.44	f	0.08
D <sub>fc1</sub>	1.2	f <sub>n</sub>	0.1
D <sub>fc2</sub>	1.3	Y <sub>1</sub>	0.68
D <sub>fa</sub>	0.75	Y <sub>2</sub>	0.1
K <sub>r</sub>	0.0023	Y <sub>3</sub>	0.1
K <sub>s</sub>	5.22	r <sub>1</sub>	0.12
K <sub>s</sub>	0.0823	r <sub>n</sub>	4.33
K <sub>o</sub>	0.0005	ω	7.14
K <sub>or</sub>	0.0001	β	2.88
K <sub>mc2</sub>	0.00033	θ	3.57
K <sub>mc3</sub>	0.0033	σ	3.57
K <sub>c1</sub>	0.0005	L	0.01

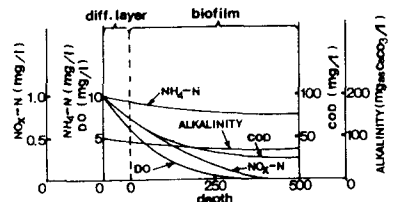


図-1 膜内外における各水質項目の濃度分布

に膜内の低DO領域において二次基質が酸化されにくく、全体として膜深部の方がCOD濃度が高くなる傾向がみられる。液相中のDO濃度がさらに低くなると、Lysis反応により生じた二次基質が酸化されにくくなるとともに、膜表面近傍で酸化、脱窒により有機物が消費されるため、深さ方向に有機物濃度が高くなる傾向はさらに顕著となり、この場合は有機物の膜表面への逆輸送が生じる。図-3は二次基質の生成を考慮しない場合について図-2と同様の条件で計算した結果である。二次基質を考慮した場合の方が明らかに脱窒反応がよく進行しており、こうした二次基質の寄与により内生脱窒反応をうまく表わすことができた。図-4と図-5は液相内のアルカリ度が異なる場合について計算した結果である。図-4では有機物の酸化が十分進んでおり、図-5と比較して脱窒反応が生じにくくなっている。これはNH<sub>4</sub>-Nの硝化反応がアルカリ度に律速され、酸素がおもに有機物の酸化に用いられたためと考えられる。一方、図-5では、アルカリ度が十分あるため硝化反応が進み、膜深部において酸素がほとんど消費されてしまい、酸素による有機物の酸化もあまり生じないことも作用して脱窒反応が十分進行している。

生物膜による各水質項目の除去フラックスを計算した例として、図-6に液相内の有機物濃度とNH<sub>4</sub>-Nの除去フラックスとの関係を示す。液相内の有機物濃度が高くなるにつれて、その除去フラックスが低下している。これは有機物濃度が高くなると、その酸化反応に消費される酸素量が多くなり、硝化反応が律速されるためと考えられる。また、液相内のDO濃度あるいはアルカリ度とNH<sub>4</sub>-N除去フラックスと関係については、いずれもMonod型となる計算結果が得られた。この詳細については講演時に報告する。

4. 有機物除去に関するシミュレーションと実験的検討

人工下水で培養した生物膜を図-7に示した実験装置に設置し、示した実験装置に設置し、DOを7.0 mg/l, PHを7.0に制御しながら、グルコースを主成分とする人工下水を連続的に流入させ、定常状態で有機物の除去フラックスを測定した。実験結果と上記方法によるシミュレーション結果を図-8に示す。両者は傾向的によく一致している。両者の値が一致しない原因としては膜厚等各種パラメータの測定上の誤差と膜が厚い場合に生じる計算精度上の問題が考えられる。

最後に、実験に労を煩わした本学学生、飛田博滋君に深謝致し

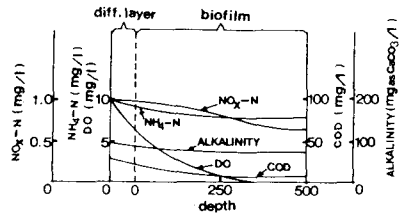


図-2 膜内外における各水質項目の濃度分布

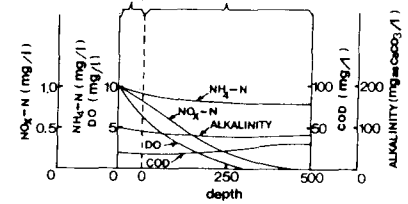


図-3 膜内外における各水質項目の濃度分布

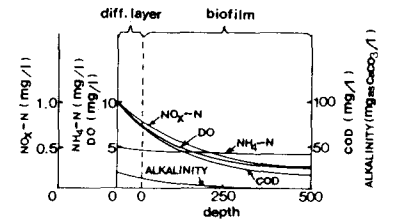


図-4 膜内外における各水質項目の濃度分布

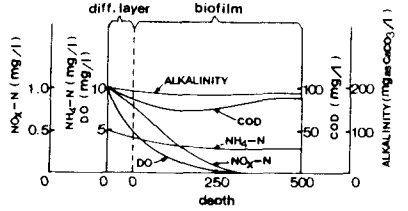


図-5 膜内外における各水質項目の濃度分布

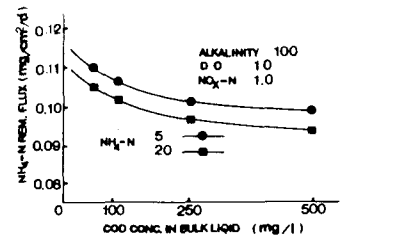


図-6 液相の有機物濃度とNH<sub>4</sub>-N除去フラックスの関係

- 【記号】
- S, C, O<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, A: 有機物、酸素、NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N, アルカリ度の濃度
  - Subscript b, s, f: 液相内、膜表面、膜内
  - Dw, Dr: 液相内、膜内の拡散係数
  - lb: 液相内の除去フラックス
  - ly: 液相内の lysis 定数 (1/day)
  - C<sub>01</sub>: 膜内におけるN<sub>2</sub>濃度 (液体換算, mgN<sub>2</sub>/cm<sup>3</sup>)
  - f: 膜生物体の中に占める非生分解性物質の割合 (-)
  - F<sub>n</sub>: 膜生物体における窒素の含有率 (mgN/mgVSS)
  - K: 生分解性粒子状物質の二次基質への分解率 (-)
  - K<sub>1</sub>: 硝化飽和定数 (mgNH<sub>4</sub>-N/cm<sup>3</sup>)
  - K<sub>c2</sub>: 脱窒飽和定数 (mgN<sub>2</sub>/cm<sup>3</sup>)
  - K<sub>f</sub>: アルカリ度飽和定数 (mgアルカリ度/cm<sup>3</sup>)
  - K<sub>nc2</sub>: 最大硝化反応速度定数 (mgNO<sub>x</sub>-N/mgVSS/day)
  - K<sub>nc3</sub>: 最大脱窒反応速度定数 (mgN<sub>2</sub>/mgVSS/day)
  - K<sub>ns</sub>: 最大基質消費速度定数 (mgCOD/mgVSS/day)
  - K<sub>o</sub>: 酸素飽和定数 (mgO<sub>2</sub>/cm<sup>3</sup>)

- K<sub>or</sub>: 脱窒反応における酸素の飽和定数 (mgO<sub>2</sub>/cm<sup>3</sup>)
- K<sub>r</sub>: 有機態窒素のアンモニフィケーション速度定数 (mgN/mgN/day)
- K<sub>s</sub>: 基質飽和定数 (mgCOD/cm<sup>3</sup>)
- L: 膜表面における拡散層の厚さ (cm)
- P: CODと微生物量の変換係数 (mgCOD/mgVSS)
- r<sub>2</sub>: 基質酸化率 (mgO<sub>2</sub>/mgCOD)
- r<sub>n</sub>: 硝化に必要な酸素消費量 (mgO<sub>2</sub>/mgNH<sub>4</sub>-N)
- K<sub>f</sub>: 微生物密度 (mgVSS/cm<sup>3</sup>)
- Y<sub>1</sub>: 基質の収率係数 (mgVSS/mgCOD)
- Y<sub>2</sub>: NH<sub>4</sub>-Nの収率係数 (mgVSS/mgNH<sub>4</sub>-N)
- Y<sub>3</sub>: NO<sub>x</sub>-Nの収率係数 (mgVSS/mgNO<sub>x</sub>-N)
- Z: 膜深さ方向の距離 (cm)
- β: 脱窒に利用されるCOD換算係数 (mgCOD/mgNH<sub>4</sub>-N)
- θ: 脱窒により生成するアルカリ度の換算係数 (mgアルカリ度/mgN)
- σ: 細菌合成に消費されるアルカリ度 (mgアルカリ度/mgN)
- ω: 硝化に必要なアルカリ度の換算係数 (mgアルカリ度/mgN)

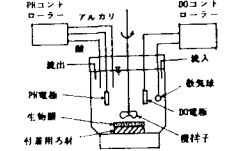


図-7 実験装置