

## II-414

## 生物膜における内生脱窒反応のモデル化について

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 生物膜法においては、液相内における有機炭素濃度が低い場合においても脱窒反応がすみやかに進行する現象がよく観察される。著者らは従来、生物膜法における有機物と窒素の同時除去モデル化について検討を行っているが、このような内生脱窒反応が支配的な系においても同モデルの適用を可能とするために、死滅微生物の加水分解などにより生成する二次基質と内生脱窒反応との関係を考慮したモデル式を提案している。<sup>1)</sup>本研究では、二次基質の生成と消費の特性を明らかにする一助として二次基質の分子量分布について調べるとともに、提案したモデル式の妥当性について実験的な検討を行った。

2. 二次基質の分子量分布 生物膜において生成した二次基質の分子量分布は基本的には活性汚泥のそれと同様であると考え、本研究では活性汚泥を用いて以下の実験を行った。

2.1 実験方法 グルコースを主成分とする人工下水で培養した活性汚泥を十分に空曝気、水道水により洗浄したあと、pHを4.0と7.0に制御した二つの反応槽（2ℓビーカー）にそれぞれ入れ、空曝気条件下で反応槽内のMLSS、溶解性COD<sub>cr</sub>の経時変化を調べた。反応終了後、反応槽から十分量の試料を採取し、ガラスフィルター（東洋GS-25）によりろ過したのち、限外ろ過装置（東洋UHP-43、ウルトラフィルターUH,UK）によりこれら試料中のCOD<sub>cr</sub>、炭水化物の分子量を分画した。

2.2 実験結果と考察 COD<sub>cr</sub>の溶出に関する実験結果を図-1に示す。この図より、微生物の代謝活動に影響を与えないpH7.0では反応槽内COD<sub>cr</sub>の増加がわずかであるのに対し、その代謝活動に好ましくないpH4.0では槽内COD<sub>cr</sub>が時間とともにほぼ直線的に増加した。また反応終了時のろ水の各分子分画試料中のCOD<sub>cr</sub>と炭水化物の全体に占める割合

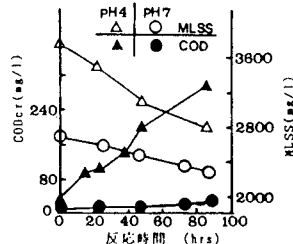


図-1 空曝気下における槽内COD<sub>cr</sub>、MLSSの経時変化

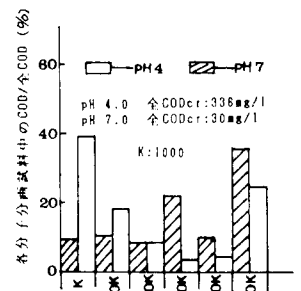


図-2 槽内COD物質の分子分画

をそれぞれ図-2と図-3に示す。図-2より、COD物質については、pH4.0では分子量10000以下のものの割合がほぼ60%を占めているのに対し、pH7.0では19%以下にとどまっている。また図-3の炭水化物についても、pH4.0では分子量10000以下のものが占める割合がほぼ50%であるのに対し、pH7.0ではその約1/2であった。図1～3の結果をまとめると、微生物相からは常に微生物代謝反応に利用される有機性物質（二次基質）が溶出し、本実験では、pH4.0条件下で溶出したCOD物質、炭水化物のうち、分子量10000以下のものが半分以上を占めていることがわかった。

### 3. 内生脱窒反応のモデル化と実験的検討

3.1 モデル式 生物膜における内生脱窒反応を考慮したモデル式を表-1に示す。本モデルは液相内に有機炭素源がほとんどなく、液相中に存在するNO<sub>x</sub>-Nが生物膜により除去される場合の内生脱窒反応を記述するものである。なお、本モデルでは、液相内のアルカリ度とNH<sub>4</sub>-Nが低い系を対象とし、硝化反応については無視した。モデル中の使用記号は最後に一括して示す。

3.2 パラメータの決定 ここでは、従来検討されていない膜内での内生脱窒反応と関連するパラメータK<sub>mn</sub>, K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub>について実験により検討した。なお、その他のパラメータは文献によった。

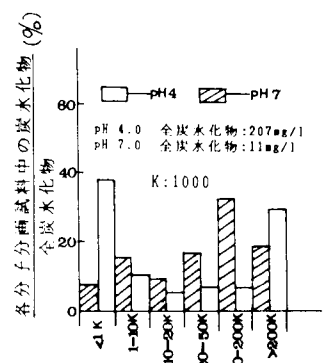


図-3 槽内炭水化物の分子分画

3.2.1 実験方法と結果 浸漬型回転円板装置(容量 8 L, 円板数 9, 円板直径15cm)を用いて、グルコースを主成分とする人工下水により培養した生物膜を円板から取りはずしてホモジナイザーにより分散し、水道水により洗浄したのち、窒素曝気とpH調整を行い、均等に四つの反応器(1 L 三角フラスコ)に封入した。次に、一定量の

NaNO<sub>3</sub> のみを各反応器に注入し、密閉下で各反応器中の溶解性COD<sub>cr</sub>, NO<sub>3</sub>-Nの経時変化を調べた。なお実験

は20℃の恒温で行った。得られた結果を図-4 ~5 に示す。

3.2.2 決定手法 本実験では、生物膜を分散化し、かつ反応器内の溶存酸素濃度がゼロであったので、表-1中の④~⑥式は次のように書き直すことができる。

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{K_{mn} \cdot N}{K_n + N} \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot X_a + K \cdot b \cdot P \cdot (1-f) \cdot X_a \quad (7)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{K_{mn} \cdot N}{K_n + N} \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot X_a \quad (8)$$

この両式を連立させ、上記の実験結果に基づいてシンプレックス法により各Run のK<sub>mn</sub>, K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub> を決定した。これらの平均値を表-2に示す。図-4, 図-5中の実線はこれらのパラメータ値を用いて計算した結果を示している。

### 3.3 モデルの実験的検討

3.3.1 実験方法 前記3.2.1 で用いた生物膜反応装置(浸漬型回転円板装置)に蒸留水を注入し、一定量のNaNO<sub>3</sub> と栄養塩のみを添加し、槽内pH, DOを一定値に制御しながら槽内COD<sub>cr</sub> とNO<sub>3</sub>-Nの経時変化を調べた。膜密度と膜厚さは実験終了後に文献1)に示した方法により測定した。

3.3.2 実験結果とモデルシミュレーション 本モデルの解析は、膜底面における各水質項目のフラックスが零であるとともに、液相から膜表面への各水質項目の移動フラックスが膜内へのそれと等しいと仮定し、表-1に示した各式を差分化して行った。実験結果とそれに対応する計算結果を図-6に示す。計算結果は傾向的に実験結果をよく再現しており、モデルの妥当性が認められる。

4. おわりに 本研究では、微生物から溶出したCOD 物質と炭水化物の分子量分布を調べ、生物膜における内生脱窒反応を記述するモデルの妥当性について実験的な検討を行った。[記号]

今後、膜厚さや溶存酸素などの内生脱窒への影響について検討する必要がある。

参考文献  
1)寺島ら; 衛生工学研究論文集, Vol.23 (1987)

S, C, N: 液相内有機物, 酸素, NO<sub>x</sub>-N の濃度(mg/l)  
S<sub>f</sub>, C<sub>f</sub>, N<sub>f</sub>: 膜内有機物, 酸素, NO<sub>x</sub>-N の濃度(mg/l)  
D<sub>ws</sub>, D<sub>wc</sub>, D<sub>wn</sub>: 液相内有機物, 酸素, NO<sub>x</sub>-N の拡散係数(cm<sup>2</sup>/day) D<sub>fs</sub>, D<sub>fc</sub>, D<sub>fn</sub>: 膜内有機物, 酸素, NO<sub>x</sub>-N の拡散係数(cm<sup>2</sup>/day) t: 反応時間(min.)  
b: 微生物のlysis 定数(1/day)  
f: 微生物体の中に占める非生分解性物質の割合(-)  
K: 生分解性粒子状物質の二次基質への分解率(-)  
K<sub>n</sub>: 脱窒飽和定数(mgNO<sub>3</sub>-N/l)  
K<sub>ms</sub>: 最大基質消費速度定数(1/day)  
K<sub>mn</sub>: 最大脱窒速度定数(1/day)

K<sub>o</sub>: 酸素飽和定数(mgO<sub>2</sub>/l)  
K<sub>or</sub>: 脱窒反応における酸素の飽和定数(mgO<sub>2</sub>/l)  
K<sub>s</sub>: 基質飽和定数(mgCOD/l)  
L<sub>o</sub>: 膜表面における拡散層の厚さ(cm)  
L<sub>f</sub>: 膜厚さ(cm)  
P: COD と微生物量の変換係数(mgCOD/mgVSS)  
r: 基質酸化率(mgO<sub>2</sub>/mgCOD)  
β: 脱窒に利用されるCOD 換算係数(mgCOD/mgN)  
X<sub>f</sub>: 微生物密度(mgVSS/cm<sup>2</sup>)  
X<sub>a</sub>: 微生物濃度(mgVSS/l)  
Z: 膜深さ方向の距離(cm)

表-1 生物膜における内生脱窒反応のモデル

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |                                                                                                                                                                                             |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 液相内                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |                                                                                                                                                                                             |     |
| $\frac{dS}{dt} = D_{ws} \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2}$                                                                                                                                                                                                                                                             | (1) | $\frac{dC}{dt} = D_{wc} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}$                                                                                                                                  | (2) |
| $\frac{dN}{dt} = D_{wn} \frac{\partial^2 N}{\partial Z^2}$                                                                                                                                                                                                                                                             | (3) |                                                                                                                                                                                             |     |
| 2. 膜内                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |                                                                                                                                                                                             |     |
| $\frac{\partial S_f}{\partial t} = D_{fs} \frac{\partial^2 S_f}{\partial Z^2} - \frac{K_{ms} \cdot S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot X_f - \beta \frac{K_{mn} \cdot N_f}{K_n + N_f} \cdot \frac{S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{K_{or}}{K_{or} + C_f} \cdot X_f + K \cdot b \cdot P \cdot (1-f) \cdot X_f$ | (4) |                                                                                                                                                                                             |     |
| $\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_{fc} \frac{\partial^2 C_f}{\partial Z^2} - \frac{K_{ms} \cdot S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{C_f}{K_o + C_f} \cdot X_f$                                                                                                                                                              | (5) | $\frac{\partial N_f}{\partial t} = D_{fn} \frac{\partial^2 N_f}{\partial Z^2} - \frac{K_{mn} \cdot N_f}{K_n + N_f} \cdot \frac{S_f}{K_s + S_f} \cdot \frac{K_{or}}{K_{or} + C_f} \cdot X_f$ | (6) |

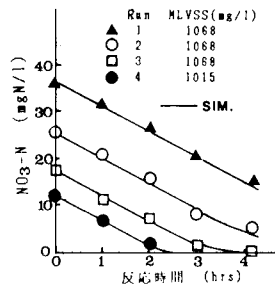


図-4 槽内NO<sub>3</sub>-Nの経時変化

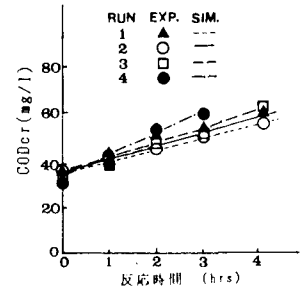


図-5 槽内COD<sub>cr</sub>の経時変化

表-2 計算に用いたパラメータ値

| sym.            | value | dimension            | sym.            | value | dimension               |
|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|-------------------------|
| D <sub>ws</sub> | 0.8   | cm <sup>2</sup> /day | K <sub>n</sub>  | 0.8   | mgN/l                   |
| D <sub>wc</sub> | 1.8   | cm <sup>2</sup> /day | X <sub>f</sub>  | 10.24 | mgVSS/cm <sup>2</sup>   |
| D <sub>wn</sub> | 1.4   | cm <sup>2</sup> /day | K <sub>ms</sub> | 3.0   | l/day                   |
| D <sub>fs</sub> | 0.44  | cm <sup>2</sup> /day | K <sub>o</sub>  | 0.5   | mgO <sub>2</sub> /l     |
| D <sub>fc</sub> | 1.44  | cm <sup>2</sup> /day | K <sub>s</sub>  | 0.45  | l/day                   |
| D <sub>fn</sub> | 1.2   | cm <sup>2</sup> /day | P               | 1.42  | mgCOD/mgVSS             |
| L <sub>f</sub>  | 0.145 | cm                   | f               | 0.08  | (-)                     |
| L <sub>o</sub>  | 0.01  | cm                   | r               | 0.12  | mgO <sub>2</sub> /mgCOD |
| K <sub>s</sub>  | 10.41 | mgCOD/l              | r <sub>2</sub>  | 2.86  | mgCOD/mgN               |
| K <sub>or</sub> | 0.1   | mgO <sub>2</sub> /l  | K <sub>mn</sub> | 0.141 | 1/day                   |

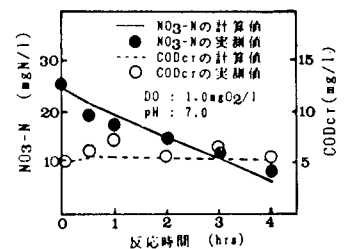


図-6 空曝気下における生物膜反応槽内NO<sub>3</sub>-N, COD<sub>cr</sub>の経時変化