

京都大学 工学部 学生員 西村 文武
 京都大学 工学部 正会員 津野 洋
 京都大学 工学部 正会員 宗宮 功

1. はじめに

著者らは、担体にゼオライトを用いた硝化反応器(生物ゼオライト反応器)についての検討を行ってきた。この反応器ではゼオライトに付着増殖した細菌群による硝化を行わずと同時に、ゼオライト自身の持つアンモニア性窒素のイオン交換・吸着作用により速やかに液相中のアンモニア性窒素濃度の低下、除去できることから、特に微生物阻害が生ずるような高濃度のアンモニア性窒素含有廃水に対して有用であることが示されている。本研究では、生物ゼオライト反応器による処理機構について数理モデルの提示を試みた。

2. 実験概要

有効容積2.5Lの反応器に生物ゼオライトを50g投入し、表1に示される組成の無機性人工廃水に有機物としてグルコース、グルタミン酸ナトリウムを重量比で3:1混合した基質を加えたものを有機物含有人工廃水とし、アンモニア性窒素の負荷率が約0.1mgN/gZ/hrとなるように連続通水し、定常状態が得られたと考えられる約50日間運転を行った。実験に供した人工廃水中の有機物濃度は、有機炭素とケルゲル窒素との比(以後C/N比と略す)が0~6の範囲内で各々設定し、各ケースでは一定になるように実験を行った。次に、アンモニア性窒素が吸着されている生物ゼオライトをアンモニア性窒素の含まれない人工廃水に投入し、生物学的硝化を行わせることでゼオライトのアンモニア性窒素吸着能の再生について回分式実験により検討した。この実験では硝化が進行するにつれアルカリ度の枯渇が生じたため実験開始後12日目でアルカリ度として炭酸水素ナトリウムを供給した。以上の実験はいずれも20℃に保たれた恒温室にて行った。

3. モデルの概要とモデル式

ここで提示したモデルは、反応器中でアンモニア性窒素はゼオライトとの固液間の平衡関係を保持し、その物質移動速度は平衡関係からのずれに比例するとし、かつゼオライト表面に付着増殖した微生物による同化過程、および硝化過程により消費されること、また単位ゼオライトに付着しうる微生物量には限界があり、付着微生物量が最大保持微生物量に近くなるにつれ混雑効果による微生物付着競争が生じることを主な機構とした簡単なものである。モデルに含まれる状態変数は液相中アンモニア性窒素濃度(X_A mgN/L)、ゼオライトに吸着されたアンモニア性窒素量(q mgN/gZ)、酸化態窒素濃度(X_B mgN/L)、溶解性有機炭素濃度(X_C mgC/L)、付着性他栄養細菌群(B_H mgSS/gZ)、付着性自栄養細菌群量(B_A mgSS/gZ)、アルカリ度(AL mgCaCO₃/L)である。このモデルに含まれる各過程の速度式は以下のように表示される。

イオン交換・吸着速度(R_1 mgN/L・hr)

$$R_1 = k_1 \cdot (q^* - q) \cdot (Z/V) \quad (1) \quad q^* = k_2 \cdot X_A^{(1/k_3)} \quad (2)$$

表1 人工廃水組成

成分	濃度 (mg/L)
NH ₄ Cl	764
NaHCO ₃	3167
KH ₂ PO ₄	67
MgSO ₄ ·7H ₂ O	400

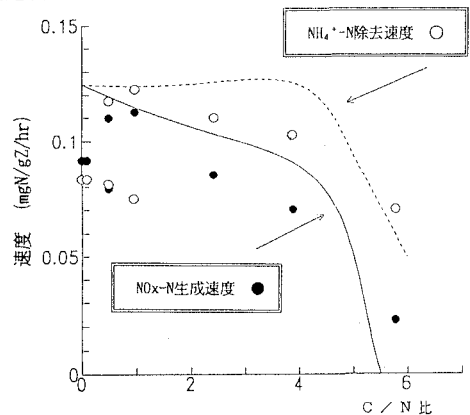


図1 NO_x-N生成速度、NH₄⁺-N除去速度 (曲線は計算値)

自栄養細菌の窒素の同化速度 (R_3 mgN/L·hr)

$$R_3 = \gamma_{ASN} \cdot \mu_a \cdot B_a \cdot (Z/V) \quad (3)$$

$$\mu_a = \mu_{a_{max}} \{X_a / (K_{NA} + X_a)\} \cdot FPH \cdot FK \quad (4)$$

$$FPH = \begin{cases} 1 - 3.33(7.2 - pH) & : (pH < 7.2) \\ 1 & : (pH > 7.2) \end{cases} \quad (5)$$

$$pH = 6 + \{4 \cdot AL / (50 + AL)\} \quad (6)$$

$$FK = \begin{cases} 1 - \{(B_a + B_H) - B_c\} / (B_{max} - B_c) & : (B_a + B_H) > X_c \\ 1 & : (B_a + B_H) < X_c \end{cases} \quad (7)$$

他栄養性細菌の窒素同化速度 (R_4 mgN/L·hr)

$$R_4 = \gamma_{HSN} \cdot \mu_H \cdot B_H \cdot (Z/V) \quad (8)$$

$$\mu_H = \mu_{H_{max}} \{X_H / (K_{NH} + X_H)\} \cdot \{X_C / (K_C + X_C)\} \cdot FK \quad (9)$$

生物学的硝化速度(酸化態窒素生成速度) (R_2 mgN/L·hr)

$$R_2 = (\mu_n / Y_n) \cdot X_n \cdot (Z/V) - R_3 \quad (10)$$

アモニア性窒素の等温交換式は実験結果よりフロイトリ型の式で近似した。本研究で行った実験では、曝気による攪拌で反応槽内を完全混合状態となるように設定した。従って各状態変数の時間的变化は次式で示される。

液中アモニア性窒素、硝酸性窒素、溶解性有機炭素濃度

$$V \cdot dX_a / dt = Q_{IN} (X_{aIN} - X_a) - VR_1 - VR_2 - VR_3 - VR_4 \quad (11)$$

$$V \cdot dX_b / dt = Q_{IN} (X_{bIN} - X_b) + VR_2 \quad (12)$$

$$V \cdot dX_c / dt = Q_{IN} (X_{cIN} - X_c) - VR_4 \cdot \gamma_{HSC} / (\gamma_{HSN} \cdot Y_H) \quad (13)$$

付着性自栄養細菌群、付着性他栄養細菌群

$$Z \cdot dB_a / dt = VR_3 / \gamma_{ASN} - k_{BAJB} \cdot B_a \cdot Z - k_{BAHK} \cdot B_a \cdot Z \quad (14)$$

$$Z \cdot dB_H / dt = VR_4 / \gamma_{HSN} - k_{BHJB} \cdot B_H \cdot Z - k_{BHKK} \cdot B_H \cdot Z \quad (15)$$

アルカリ度、セトライト固相中(吸着)アモニア性窒素濃度

$$V \cdot dAL / dt = Q_{IN} (AL_{IN} - AL) - VR_2 \cdot \gamma_{AL} \quad (16)$$

$$Z \cdot dq / dt = VR_1 \quad (17)$$

ここで、 V は反応槽容積(L)、 Z はセトライト投入量(gZ)、 k_1 はイオン交換速度定数(0.067 1/hr)、 k_2 および k_3 は吸着定数(0.0045および25)、 q^* は平衡吸着量(mgN/gZ)、 $\mu_{a_{max}}$ および $\mu_{H_{max}}$ は最大比増殖速度(0.022 1/hrおよび0.1 1/hr)、 Y_n 、 Y_H は収率(0.165mgSS/mgNおよび0.5mgC/mgC)、 γ_{ASN} および γ_{HSN} は細菌の窒素含有率(0.124mgN/mgSS)、 γ_{HSC} は他栄養細菌の炭素含有率(0.531 mgC/mgSS)、 γ_{AL} は単位硝化量当りのアルカリ度消費量(7.07 mgCaCO₃/mgN)、 K_{NA} 、 K_{NH} および K_C は細菌の増殖に関する半飽和定数(0.1mgN/L、0.1mgN/Lおよび5 mgC/L)、 B_{max} は担体最大保持SS濃度(60 mgSS/gZ)、 B_c は混雑効果影響SS濃度(30 mgSS/gZ)、 k_{BAJB} および k_{BHJB} は細菌の自己分解定数(0.0015 1/hrおよび0.005 1/hr)、 k_{BAHK} および k_{BHKK} は細菌の剥離定数(0.00708 1/hr)である。モデル式に含まれる諸係数の値は、回分式実験結果より決定した。

4. シミュレーション結果および検討

図1に有機物含有廃水処理実験での流入水C/N比に対するアモニア性窒素除去速度と酸化態窒素生成速度の関係について示す。シミュレーション結果は曲線で実測値はプロットで表示した。実験結果をよくシミュレートしていると理解される。またC/N比が4までのケースでは、微生物の同化と硝化作用によりアモニア性窒素除去はなされるが、硝化に利用されるアモニア性窒素の割合は、徐々に低下することが示され、十分な硝化を行わずには、有機物負荷率が0.1mgN/gZ/hr前後の時、C/N比が2以下であることが必要な条件であることが示がされている。また図2に、生物学的再生を行った時の実測値とシミュレーション結果について示す。この場合でも計算結果は実験結果とよく一致することが示され、生物学的硝化とアモニア性窒素の吸着が独立な機構として作用していることを示している。

5. 結語

本研究では、生物セトライトによる有機物含有廃水処理特性が、混雑効果による自栄養性細菌、他栄養性細菌間の競合を組み込んだモデルにより表示できることを示し、また反応機構について生物学的硝化およびセトライトによる吸着が独自に作用するものであることを実験結果との比較により示した。

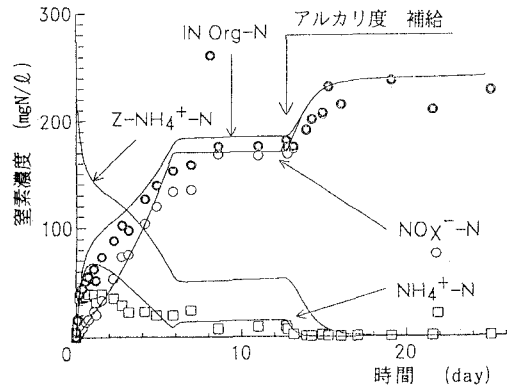


図2 生物学的再生(曲線は計算値)