

群馬大学工学部 学生員 田中恒夫

正会員 渡辺智秀

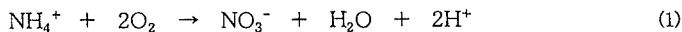
正会員 黒田正和

1. はじめに

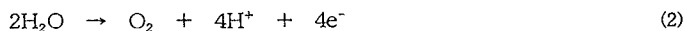
生物学的脱窒素処理は、好気的環境での硝化反応と嫌気的環境での脱窒反応の異なる過程を経ることにより進行するが、プロセスのコンパクト化あるいは高機能化の見地から、単一反応槽で硝化・脱窒同時処理が可能なプロセスの研究開発は重要である。しかしながら、液本体 DO 濃度の制御のみでは、生物膜内の酸素や脱窒過程で必要となる水素供与体の濃度の制御は必ずしも容易ではなく、高い硝化・脱窒効率を得ることは困難となっている。筆者らは、硝化菌固定化電極(陽極)を用い通電により生成される酸素を生物膜へ直接供給する硝化プロセス(バイオエレクトロ法)を提案し、低液本体 DO 濃度下で通電硝化実験を行い、電解生成酸素による硝化反応促進効果すなわち単一反応槽での硝化・脱窒同時処理の可能性等を示した^{1),2)}。本研究では、本法による硝化について、生物膜モデルを構築して数値解析を行い、その特性を理論的に検討した。

2. 基礎式

生物学的硝化において、廃水中のアンモニア性窒素は式(1)のように最終的に硝酸性窒素まで酸化される。



一方、陽極では水の電気分解により式(2)に従い酸素が生成される。



バイオエレクトロ法は、この電解によって生成する酸素を生物学的硝化反応に利用するものである。

硝化速度式を double Monod 型で表し、さらに本法の電圧条件ではアンモニウムイオン等のイオンの移動に対する電気泳動の影響は無視できると仮定して²⁾、生物膜内の基質等の移動が分子拡散によるとすると、定常状態における物質収支式は以下になる。

$$D_{\text{NH}_4} \frac{d^2 C_{\text{NH}_4}}{dy^2} - r_{\text{NH}_4} = 0 \quad (3), D_{\text{O}_2} \frac{d^2 C_{\text{O}_2}}{dy^2} - \alpha \cdot r_{\text{NH}_4} = 0 \quad (4), r_{\text{NH}_4} = \frac{k_{\text{NH}_4} \cdot X_{\text{NH}_4} \cdot C_{\text{NH}_4}}{K_{m_{\text{NH}_4}} + C_{\text{NH}_4}} \cdot \frac{C_{\text{O}_2}}{K_{m_{\text{O}_2}} + C_{\text{O}_2}} \quad (5)$$

境界条件は、

$$y=0, D_{\text{NH}_4} \frac{dC_{\text{NH}_4}}{dy} = 0, D_{\text{O}_2} \frac{dC_{\text{O}_2}}{dy} = 0 \text{ (通電なし)} \quad (6), y=L, C_{\text{NH}_4} = C'_{\text{NH}_4}, C_{\text{O}_2} = C'_{\text{O}_2} \text{ (通電なし)} \quad (7)$$

通電条件下では、酸素に関して電極表面(y=0)において、

$$D_{\text{O}_2} \frac{dC_{\text{O}_2}}{dy} = -\frac{i \cdot \tau \cdot \varepsilon \cdot \nu}{4 \cdot F \cdot A} \quad (8)$$

ここに、 D : 拡散係数 (m^2/day)、 C : 物質濃度 (g/m^3)、 C' : 生物膜表面物質濃度 (g/m^3)、 y : 電極からの距離 (m)、

r : 微生物反応速度 ($\text{g-N}/\text{m}^3/\text{day}$)、 k : 速度定数 ($\text{g-N}/\text{g-vs}/\text{day}$)、 X : 菌体濃度 ($\text{g-vs}/\text{m}^3$)、

L : 生物膜厚 (m)、 α : 化学量論係数($=4.57$) ($\text{g-O}_2/\text{g-N}$)、 K_m : 飽和定数 (g/m^3)、 i : 電流 (C/sec)、

F : ファラデー定数 ($96485\text{C}/\text{mol}$)、 A : 電極面積 (m^2)、 ε : 酸素生成効率($=1.0$) (-)、

τ : 時間変換 (sec/day)、 ν : 酸素モル質量 ($\text{g-O}_2/\text{mol}$)

式(3)~(8)式を無次元変換すると(9)~(13)式ようになる。

キーワード: 硝化、バイオエレクトロリアクター、電気分解、生物膜モデル

連絡先: 〒376 群馬県桐生市天神町 1-5-1 TEL (0277) 30-1630

$$\frac{d^2 \theta_{NH_4}}{dY^2} = \frac{\psi^2_{NH_4} \cdot \theta_{NH_4}}{1 + \omega_{NH_4} \cdot \theta_{NH_4}} \cdot \frac{\omega_{O_2} \cdot \theta_{O_2}}{1 + \omega_{O_2} \cdot \theta_{O_2}} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 \theta_{O_2}}{dY^2} = \frac{\alpha \cdot \xi_{NH_4/O_2} \cdot \eta_{NH_4/O_2} \cdot \psi^2_{NH_4} \cdot \theta_{NH_4}}{1 + \omega_{NH_4} \cdot \theta_{NH_4}} \cdot \frac{\omega_{O_2} \cdot \theta_{O_2}}{1 + \omega_{O_2} \cdot \theta_{O_2}} \quad (10)$$

境界条件は、

$$Y=0, \frac{d\theta_{NH_4}}{dY} = 0, \frac{d\theta_{O_2}}{dY} = 0 \quad (\text{通電なし}) \quad (11), \quad \frac{d\theta_{O_2}}{dY} = -\phi_{O_2} \quad (\text{通電あり}) \quad (12)$$

$$Y=1, \theta_{NH_4}=1, \theta_{O_2}=1 \quad (13)$$

$$\text{但し、} Y = \frac{y}{L}, \theta_{NH_4} = \frac{C_{NH_4}}{C_{NH_4}^*}, \theta_{O_2} = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^*}, \psi_{NH_4} = \left(\frac{k_{NH_4} \cdot X_{NH_4}}{Km_{NH_4} \cdot D_{NH_4}} \right)^{1/2} \cdot L, \omega_{NH_4} = \frac{C_{NH_4}^*}{Km_{NH_4}},$$

$$\omega_{O_2} = \frac{C_{O_2}^*}{Km_{O_2}}, \xi_{NH_4/O_2} = \frac{D_{NH_4}}{D_{O_2}}, \eta_{NH_4/O_2} = \frac{C_{NH_4}^*}{C_{O_2}^*} = \frac{\omega_{NH_4} \cdot Km_{NH_4}}{\omega_{O_2} \cdot Km_{O_2}}, \phi_{O_2} = -\frac{\varepsilon \cdot \kappa}{C_{O_2}^*}, \kappa = \frac{i \cdot \tau \cdot L \cdot v}{4 \cdot F \cdot A \cdot D_{O_2}} \quad (14)$$

なお、総括反応速度に及ぼす拡散の影響は生物膜有効係数(Ef)で評価した。Efは拡散の影響がない場合の硝化速度と実際の生物膜の硝化速度の比として、式(15)のように表した。また、通電指標としても利用した。

$$Ef_{NH_4} = \frac{1 + \omega_{NH_4}}{\psi^2_{NH_4}} \cdot \frac{1 + \omega_{O_2}}{\omega_{O_2}} \cdot \frac{d\theta_{NH_4}}{dY}, [Y=1] \quad (15)$$

3. 結果及び考察

図-1及び2に、Efの ϕ_{O_2} 及び ψ_{NH_4} による変化を示す。Efは通電指標である $[\phi_{O_2} \cdot \omega_{O_2}]$ の増加に伴い増大し、通電により硝化反応が促進されることがわかる。特に、低液本体DO濃度条件(図-2)の $[\phi_{O_2} \cdot \omega_{O_2}] = 0 \sim 40$ においてEfの変化は顕著であり、この範囲での通電が効率的であると推算される。また、図-1と図-2を比較することにより、Efへの通電による効果は ω_{O_2} の増加に伴い小さくなっていることがわかる。すなわち、液本体DO濃度が高い場合(図-1)には、電解生成酸素の供給効果は低下し、液本体溶存酸素利用による硝化が顕著になることを示している。一方、通電による硝化反応速度は膜特性の指標である ψ_{NH_4} の変化にも大きく影響され、無通電時($\phi_{O_2} \cdot \omega_{O_2} = 0$)では ψ_{NH_4} が大きくなるにつれEfは減少するものの、通電の効果は ψ_{NH_4} が大きくなるほど大きく、 $\psi_{NH_4} > 3$ で顕著である。これは、通電により生物膜内への酸素フラックスが増大して酸素濃度が上昇し、硝化に有効的に利用されるためと考えられる。

図-3に、本生物膜モデルから計算された硝化速度と実測値²⁾の比較を示す。計算値と実測値の差は、低電流密度通電条件下において若干大きいものの、比較的良好に一致しており、本モデルは妥当であると考えられる。

4. まとめ

本数理モデルより、液本体DO濃度が低い時、生物膜が厚い時ほど通電による電解生成酸素供給効果は大きくなることが示された。また、本数理モデルに基づいて計算された通電条件下の硝化速度は、実験の結果とよく一致した。

【参考文献】

- 1) 黒田、田中、渡辺、尾崎：第49回土木学会年会講演集（1994）
- 2) 黒田、田中、渡辺：第29回水環境学会講演集（1995）

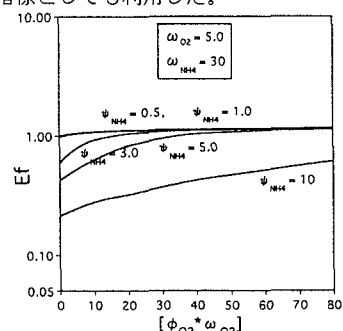


図-1 通電の硝化への効果(高DO)

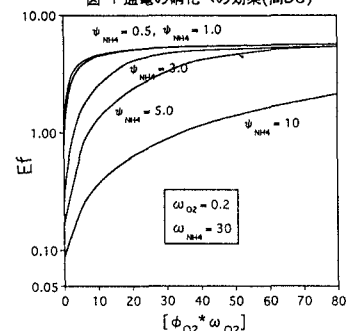


図-2 通電の硝化への効果(低DO)

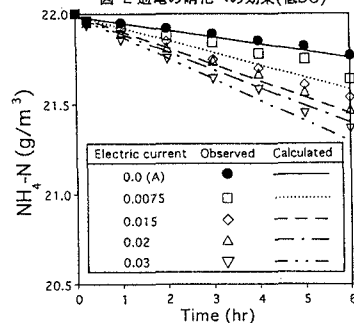


図-3 計算値と実測値の比較