

京都大学工学部 正員 津村 和志

京都大学工学部 正員 平岡 正勝

日本都市整備住宅公団 西村 志郎

1.はじめに 生物学的硝化脱窒プロセスをモデルにもとづいて設計しようとする、その反応機構の複雑さのために、たとえ流れ系に完全混合を仮定したとしても、解析的方法による設計は出来ない。(硝化までなら、Sherrard⁽¹⁾により示されたように解析的な設計もできるが。) それゆえ従来の研究ではいくつかの仮定を設けることで、モデルを簡略化することが多かった。しかしこれにはおのずと限界がある。

一方複雑化したモデルを計算機で、直接に解くのも、設計者が設計過程で得られる情報が少なくなるため、あまりいい方法とはいえない。

本研究では、生物学的硝化脱窒プロセスの設計において、計算機をどこでどのようにつかえばよいかを検討する。このために、各設計変数がシステムパフォーマンスに与える影響を調べ整理し、その結果にもとづいて計算機支援のもとにおこなわれる設計手順の提案をおこなった。

2.シミュレーション方法の概要 硝化脱窒等の反応を表す数式モデルとしては、前年度の土木学会年講で筆者らが発表したモデルを⁽²⁾つこう。これは、Sherrard⁽¹⁾のモデルをさらに発展させ、脱窒までも考慮に入れたもので、状態量は $BOD_5(S)$ 、 $NH_4^+-N(S_{NH_4})$ 、 $NO_2^--N(S_{NO_2})$ 、 $NO_3^--N(S_{NO_3})$ 、MLSS(X)、Nitrosomonas(XNS)、Nitrobacter(XNB)を、反応は好気・嫌気状態での BOD_5 除去、好気・嫌気状態での自己分解、硝化を考えている。各反応は、DOの影響を考慮している。(表1, 2)

シミュレーションの計算手法としては、解析法、線形モデル法、モジュール法があるが、本研究では、フローヤ

表1. 数式モデル

○基質分解菌増殖速度	$CALC1 = \left(\frac{\mu_{max} S}{K_S + S} \right) \left(\frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X$
○脱窒菌増殖速度	$CALC2 = \left(\frac{\mu_{max} S}{K_S + S} \right) \left(\frac{S_{NO_2}}{K_{S_{NO_2}} + S_{NO_2}} \right) \left(1 - \frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X$
○Nitrosomonas増殖速度	$CALC3 = \left(\frac{\mu_{max} S_{NH_4}}{K_{S_{NH_4}} + S_{NH_4}} \right) \left(\frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) XNS$
○Nitrobacter増殖速度	$CALC4 = \left(\frac{\mu_{max} S_{NO_2}}{K_{S_{NO_2}} + S_{NO_2}} \right) \left(\frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) XNB$
(1) BOD_5 4収	$O = (S_0 - S)(1+R)Q/V - (CALC1)/Y - (CALC2)/Y'$
(2) NH_4^+-N 4収	$O = (S_{NH_4} - S_{NH_4})(1+R)Q/V - (CALC3)/Y_{NS} - R_2(CALC1) + R_2(CALC2) + R_2 b_1 \left(\frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X + R_2 b_2 \left(\frac{S_{NO_2}}{K_{S_{NO_2}} + S_{NO_2}} \right) \left(1 - \frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X$
(3) NO_2^--N 4収	$O = (S_{NO_2} - S_{NO_2})(1+R)Q/V + (CALC3)/Y_{NS} - (CALC4)/Y_{NB}$
(4) NO_3^--N 4収	$O = (S_{NO_3} - S_{NO_3})(1+R)Q/V + (CALC4)/Y_{NB} - R_2(CALC2) - R_2 b_2 \left(\frac{S_{NO_2}}{K_{S_{NO_2}} + S_{NO_2}} \right) \left(1 - \frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X$
(5) MLSS 4収	$O = (X_0 - X)(1+R)Q/V + (CALC1) + (CALC2) - b_1 \left(\frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X - b_2 \left(\frac{S_{NO_2}}{K_{S_{NO_2}} + S_{NO_2}} \right) \left(1 - \frac{DO}{K_{DO} + DO} \right) X$
(6) Nitrosomonas 4収	$O = (XNS_0 - XNS)(1+R)Q/V + (CALC3) - b_{NS} XNS$
(7) Nitrobacter 4収	$O = (XNB_0 - XNB)(1+R)Q/V + (CALC4) - b_{NB} XNB$

表2. パラメータ値

記号	名 称	数 値
μ_{max}	最大 BOD_5 除去速度	5 day^{-1}
K_S	飽和基質濃度	100 mg/l
μ'_{max}	最大脱窒速度	0.05 day^{-1}
K'_S	脱窒反応における飽和基質濃度	0.1 mg/l
K_{O_2}	溶解酸素飽和定数	0.5 mg/l
K'_{O_2}	硝化反応における溶解酸素飽和定数	1.3 mg/l
K_{NH_4}	アンモニア性窒素飽和定数	0.5 mg/l
K_{NO_2}	亜硝酸性窒素飽和定数	0.07 mg/l
K_{NO_3}	硝酸性窒素飽和定数	0.1 mg/l
b_1	内部酸素呼吸による自己分解係数	0.06 day^{-1}
b_2	内部硝酸呼吸による自己分解係数	0.02 day^{-1}
μ_{NS}	Nitrosomonasの最大比増殖速度	0.48 day^{-1}
μ_{NB}	Nitrobacterの最大比増殖速度	0.96 day^{-1}
b_{NS}	Nitrosomonasの比死亡速度	0.12 day^{-1}
b_{NB}	Nitrobacterの比死亡速度	0.12 day^{-1}
Y	収率 (基質酸素呼吸)	0.55
Y'	収率 (基質硝酸呼吸)	0.30
Y_{NS}	Nitrosomonasの収率	0.147
Y_{NB}	Nitrobacterの収率	0.020
R_1	基質分解菌増殖に対する NH_4^+-N の割合	0.048
R_2	脱窒菌増殖に対する NH_4^+-N の割合	0.018
R_3	内部酸素呼吸による NH_4^+-N の割合	0.124
R_4	脱窒菌増殖に対する NO_2^--N の割合	0.920
R_5	内部硝酸呼吸による NO_2^--N の割合	0.496

設計条件の変更、現段階では必ずしも完成とはいえない数式モデルの変更に対しても柔軟に対応できることを理由に、モジュール法を採用した。

非線形方程式の解法としては、どのような方程式でも解の求まるという一般的な方法はないので、いくつかの手法を試みた結果、Bounded Wegstein法が計算時間、安定性の点から実用的であることがわかった。

3. 設計変数がパフォーマンスに与える影響 前節でのべた方法は汎用的な定常状態の解析法であるが、ここでは過去の研究例も多い循環法に対する解析結果を述べる。循環法の設計の自由度は4である。筆者らは設計変数として V_1/V_2 (嫌気槽容量の好気槽容量に対する比)、SRT、 V (総容量)、 R (返送比) をとり、これらがパフォーマンスに与える影響を調べた。同時に、流入条件として大きな影響を持つ流入下水のBOD/N比、及び操作変数として大きい影響を持つ各槽のDOの効果も調べた。主な結果をまとめる。

(i) 硝化菌の生存は V_1/V_2 比と SRT に支配される。SRT をどれほど多くしても生存できなくなる限界の V_1/V_2 比が存在する。

(ii) 総窒素除去率は、返送比と、 V_1/V_2 の影響を強く受ける。

(iii) 単位汚泥あたりの脱窒速度はある BOD/N 比のところで最大となる。これは BOD/N 比の小さいところでは基質律速で速度が遅くなり、逆に BOD/N 比が大きいくところでは、脱窒が十分に済み、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低くなるため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 律速で速度が遅くなるからである。ただし、脱窒速度は減少するが MLSS 濃度は上昇するため全体としての脱窒能力は増進を続ける。

(iv) 硝化槽の DO 濃度は 2~3 mg/l 程度に保てば、処理にそれほど大きな影響を持たないが、脱窒槽の DO 濃度は、パフォーマンスに少なからず影響を与える。

4. 提案する設計手順

(i) 硝化限界 V_1/V_2 を次式より求める。 V_1/V_2 はこの値より低い範囲で設定する。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\mu_{\text{NS}} \left(\frac{N}{K_{\text{NH}_4} + N} \right) \left(\frac{\text{DO}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}_2} \right) - b_{\text{NS}}}{b_{\text{NS}} - \mu_{\text{NS}} \left(\frac{N}{K_{\text{NH}_4} + N} \right) \left(\frac{\text{DO}_1}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}_1} \right)} \quad N: \text{原水 } \text{NH}_4\text{-N}$$

(ii) V_1/V_2 , R を変化させて計算機シミュレーションをおこなう。

(ii-1) 全槽容量 V を与える。初期値としては可能な限り大きい値を与える。

(ii-2) V_1/V_2 値に対して、硝化限界 SRT を次式より求め、これに安全率を乗じて SRT を決める。(安全率)

$$\text{SRT} = \alpha \cdot \left[1 / \left\{ \frac{\mu_{\text{NS}} \left(\frac{N}{K_{\text{NH}_4} + N} \right) \left(\frac{\text{DO}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}_2} + \frac{V_1}{V_2} \frac{\text{DO}_1}{K_{\text{O}_2} + \text{DO}_1} \right) - b_{\text{NS}}}{\frac{V_1}{V_2} + 1} \right\} \right]$$

(ii-3) 計算機によるシミュレーションをおこない、窒素除去率、MLSS 等を求める。

(ii-4) R の値を変え (ii-2) に戻る。

(iii) シミュレーション結果を図1のように表現する。図の読み方は、たとえば " $V_1/V_2 = 1.0$, $R = 4$ のときの SRT は約 25 日、総窒素除去率は約 68%, MLSS 濃度は約 3000 mg/l となる。

(iv) (iii) の結果より、 V_1/V_2 , R を決定する。必要ならば (ii) に戻り、 V , SRT, 安全率の設定を変更し、以後設計の諸条件を満足するまで作業をくりかえす。

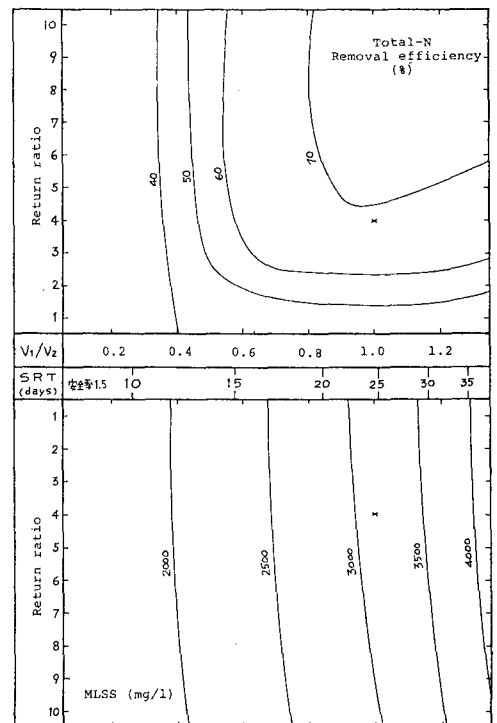


図1. 循環比、 V_1/V_2 の変化による総窒素除去率、MLSS 濃度の変化。