



Title	循環式硝化脱窒法における硝化反応効率化の検討
Author(s)	市川, 雅英; 小西, 隆裕; 久住, 美代子 他
Description	第2回衛生工学シンポジウム (平成6年11月10日 (木) -11日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 水処理 . 5-5
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 2, 201-205
Issue Date	1994-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7612
Type	departmental bulletin paper
File Information	2-5-5_p201-205.pdf



循環式硝化脱窒法における硝化反応効率化の検討

市川雅英*、○小西隆裕*、久住美代子*、豊岡和宏*

* (株)明電舎製品開発研究所
東京都品川区大崎2-1-17

概 要

現在、閉鎖性水域の富栄養化が問題となり、下水の高度処理の必要性が叫ばれている。これに対して我々は循環式硝化脱窒法による窒素除去の検討を行ってきた。しかし、この方法では最適な運転を行わないと硝化反応が律速となり、窒素除去率が低下するという点が明らかになってきている。硝化反応を引き起こす硝化菌の活性を維持するためには、反応状況をモニターする手段が必要である。そこで、活性汚泥の全呼吸速度と硝化抑制剤を添加した呼吸速度を測定し、両者の差から硝化菌の活性を推定できることを示した。そして同時に硝化に対する溶存酸素の影響を推定する方法も検討した。さらに、実測データを使って硝化反応モデル式の動力学パラメータの最適化を行い、呼吸速度計と本式を使った硝化反応の制御方法を提案する。

キーワード

循環式硝化脱窒法、硝化菌、呼吸速度、硝化反応制御

1. はじめに

下水中の窒素成分は好気条件で、亜硝酸菌によって亜硝酸性窒素に、さらに硝酸菌によって硝酸性窒素に酸化される。この反応式はアンモニア性窒素の硝酸性窒素までの酸化を考えると次のようになる。



この硝酸性窒素は無酸素条件下で脱窒菌の働きにより、以下のように窒素ガスに還元される。



上記の反応を利用して排水の窒素成分を除去する方法が生物学的窒素除去法である。排水の性状等に応じて様々な処理プロセスが提案されているが、下水処理で主に実施されている手法として循環式硝化脱窒法(以下で循環法と略す)が挙げられる。この方法は生物反応槽の前段を無酸素状態にするために曝気を行わず攪拌だけを行い、続く後段で曝気を行って生成した硝酸性窒素を前段に循環させることで流入水中の有機物を使って脱窒を行わせる方式である。従って良好な窒素除去を行うためには硝化反応と脱窒反応両方を効率よく行うことが必要不可欠である。しかし、我々の行った実下水を使った実験結果¹⁾をまとめたところ(図1)、

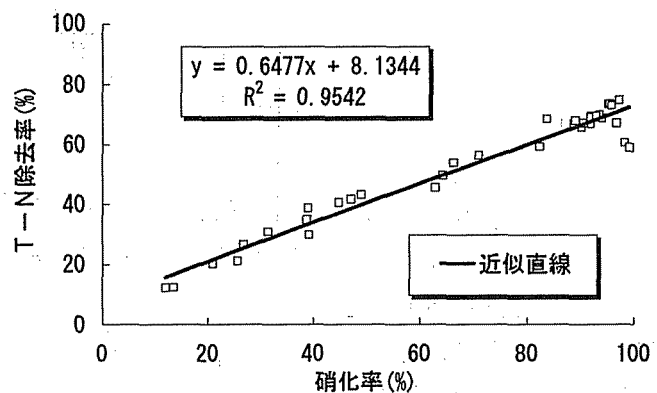


図1 硝化率と窒素除去率の関係

窒素除去率は硝化反応の如何によるところが大きく、硝化菌の活性を維持することが重要であることがわかる。そしてそのためには、硝化反応の状況をモニターする手段が必要である。一方、活性汚泥の呼吸速度に着目した微生物濃度の評価法の提案²⁾や計測器の開発³⁾が行われている。そこで本研究では、呼吸速度計を利用して硝化菌の活性をモニターする方法と、硝化に対する溶存酸素（以下でD Oと略す）の影響を推定する方法を検討した。

2. 呼吸速度とその測定例

活性汚泥の呼吸速度(以下でR_rと略す)はB O D除去と硝化反応と内性呼吸による酸素消費の和として次のように表される。

$$R_r = a_L \left(-\frac{dL}{dt} \right) + a_N \left(-\frac{dN}{dt} \right) + b \cdot X_M \quad \dots (3)$$

ここで、 a_L : 単位B O D除去当たり必要酸素量

t : 時間

a_N : 単位NH₄-N除去当たり必要酸素量

L : B O D濃度

N : NH₄-N濃度

b : 内性呼吸の酸素消費速度定数

X_M : 活性汚泥濃度

この呼吸速度は活性汚泥混合液を密閉容器に入れ、そのD Oの経時変化を測定することで得られる。この測定例を図2に示す。初期D Oが低い場合は5 (mg/L)以上になるように曝気して、その後にD Oが直線的に低下する範囲内でその直線の傾きを求め、これをR_rとする。この例ではD Oが5 (mg/L)から2 (mg/L)までの範囲で求めた。そしてその値は41.9 (mg-O₂/L·h)となった。

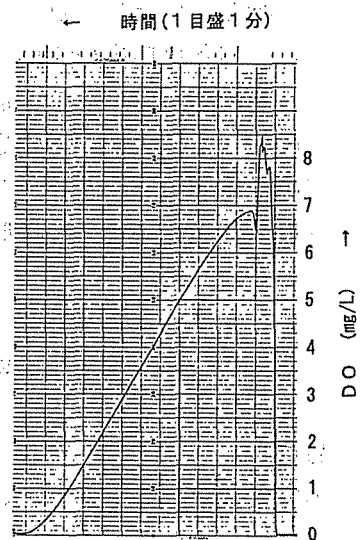


図2 R_rの測定例

次にアリルチオ尿素(AT Uと略す)のような硝化抑制剤を添加して測定すると、(3)式の第2項が0となり、B O D除去と内性呼吸の酸素消費速度が測定できる。この測定例を図3に示す。これをATU-R_rとし、この図からR_rと同様にして求めると13.0 (mg-O₂/L·h)となった。従って硝化で使われた酸素消費速度はR_rとATU-R_rの差から求めることができる。これをNit-R_rとすれば、上記の例からは、

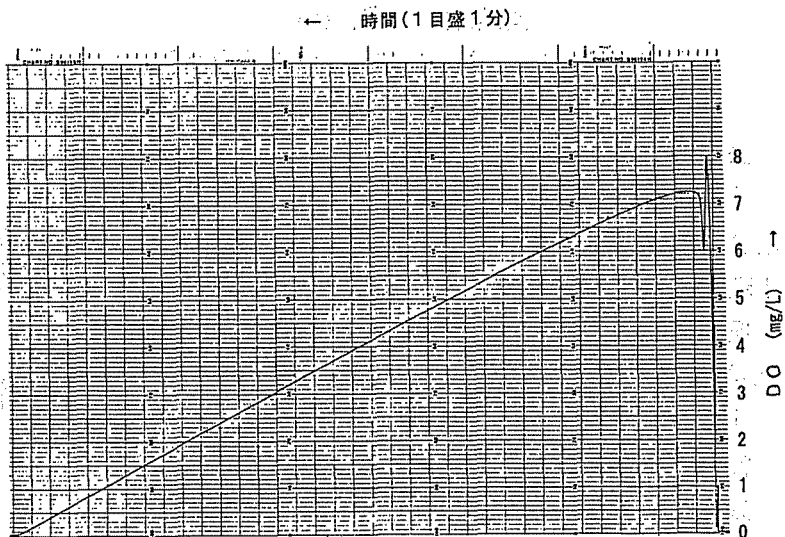


図3 ATU-R_rの測定例

$$\text{Nit-R}_r = [R_r] - [\text{ATU-R}_r]$$

$$= 41.9 - 13.0 = 28.9 \text{ (mg-O}_2\text{/L·h)} \quad \text{となった。}$$

3. 硝化反応と呼吸速度

3.1 硝化速度とNit-R rの相関

(1)式は、1 molのアンモニア性窒素を硝酸性窒素まで酸化するためには2 molの酸素が必要であることを示している。実際にはこの量論比で消費されるとは限らないが、この消費量を測定することができれば、硝化反応の進行状況が推定できる。そこで人工下水を使った活性汚泥の室内実験装置を使って、いくつかの硝化速度とNit-R rを測定した。その結果の相関のグラフを図4に示す。硝化速度は硝酸生成量を反応時間で除して求めた。ただし硝化速度のDO律速を考慮して、DOが2.5(mg/L)以下の時のデータを除いた。

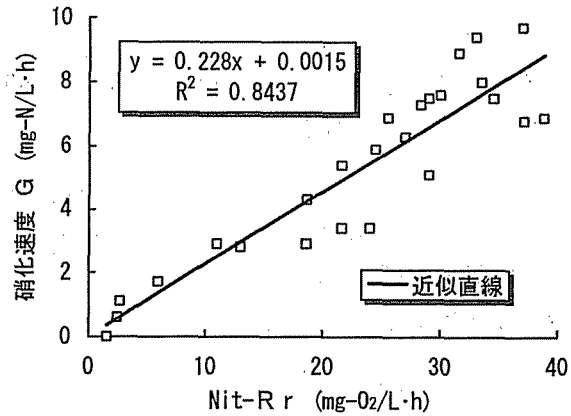


図4 Nit-R rと硝化速度の関係

3.2 硝化反応のDO律速の推定

硝化速度G(mg-N/L-h)は硝化菌量に比例し、さらに水温とpHとアンモニア性窒素濃度とDO(mg/L)に影響される。これらのなかでDOに関しては(4)式のように表される。

$$G = G_{\max} \cdot \frac{DO}{DO + K_{DO}} \quad \dots (4)$$

ここに、 G_{\max} : 最大速度(mg-N/L-h)

K_{DO} : 飽和定数(mg/L)

このように硝化速度はDOが低くなるにつれて急速に低下し、逆にDOを高くしてもある値以上ではほとんど速くならないという傾向を示す。従って K_{DO} を正確に知ることは運転管理上重要なことである。一方、硝化速度はNit-R rで推定できるから、種々のDO値におけるNit-R rを測定することで K_{DO} を推定することができる。前述したようにR rはDO変化曲線のある範囲で直線近似して求めているが、詳細に見るとそれぞれのDO値で変化している。そこで、図2と図3において、異なるDO値での接線の傾きを求めた(実際にはDO±0.2(mg/L)付近の微小区間でのNit-R rを求めた)結果を表1に示す。このDOとNit-R rの相関と回帰式による曲線を図5に示す。

表1 DOとR r, ATU-R r, Nit-R rの関係

DO (mg/L)	5.5	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5
Rr (mg-O ₂ /L-h)	41.4	42.1	42.1	40.0	36.9	30.0
ATU-Rr (〃)	12.5	12.6	12.8	13.0	13.0	13.3
Nit-Rr (〃)	28.9	29.5	29.3	27.0	23.9	16.7

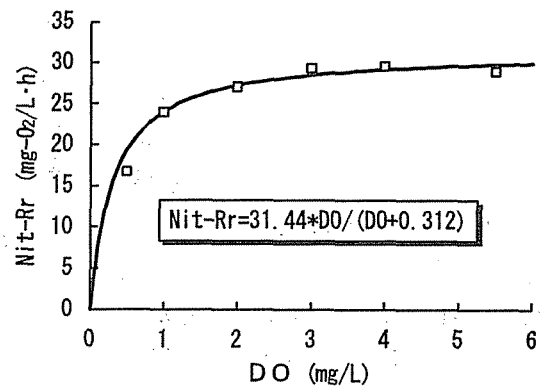


図5 DOとNit-R rの相関

3.3 呼吸速度を用いた硝化反応の制御

実下水を用いた循環法の実験装置による処理結果のデータ¹⁾をもとに硝化反応のモデル式について検討した。硝化菌の比増殖速度は(5)式のように表される⁴⁾。

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \exp\{\theta(t-15)\} \cdot [1 - Z(K_{pH} - pH)] \cdot \frac{DO}{DO + K_{DO}} \quad \dots (5)$$

比硝化速度は(6)式のようになる。

$$KN = \mu \cdot X \cdot \frac{1}{Y} \cdot \frac{1}{V_t} \cdot \frac{1}{MLSS} \cdot \frac{1}{24} \quad \dots (6)$$

硝化反応に消費される窒素量が流入窒素量の60%を最大とすると、1日当たりの硝化菌増殖量は(7)、(8)式で計算される。

$$TN_n \cdot Q_n \cdot 0.6 \cdot Y > \mu \cdot X \cdot \frac{V_o}{V_t} \quad \text{のとき} \quad DX = \mu \cdot X \cdot \frac{V_o}{V_t} \quad \dots (7)$$

$$TN_n \cdot Q_n \cdot 0.6 \cdot Y < \mu \cdot X \cdot \frac{V_o}{V_t} \quad \text{のとき} \quad DX = TN_n \cdot Q_n \cdot 0.6 \cdot Y \quad \dots (8)$$

新規硝化菌量は(9)式で表される。

$$X_{new} = X + DX - \frac{X}{SRT} - X \cdot b \quad \dots (9)$$

尚、上記(5)~(9)式の定数及び変数名を表2に示す。

表2 定数及び変数名

μ : 硝化菌比増殖速度(1/d)	X : 硝化菌量(mg)
μ_{max} : 硝化菌最大比増殖速度(1/d)	Y : 硝化菌収率(mg/mg-N)
θ : 温度係数(-)	V_t : 反応槽容積(L)
t : 水温(°C)	MLSS : 汚泥濃度(g/L)
pH : 水素イオン濃度(-)	DX : 硝化菌増殖量(mg/d)
Z : pH係数(-)	TN_{in} : 流入窒素濃度(mg/L)
K_{pH} : pH飽和定数(-)	V_o : 硝化槽容積(L)
DO : 溶存酸素濃度(mg/L)	Q_{in} : 1日当たりの流入水量(L/d)
K_{DO} : DO飽和定数(mg/L)	X_{new} : 新規硝化菌量(mg)
KN : 比硝化速度(mg-N/g-ss·h)	b : 硝化菌自己分解係数(1/d)

上式の μ_{max} 、 θ 、Z、 K_{pH} 、 K_{DO} 、Y、bの各動力学パラメータと初期硝化菌量 X_0 を求めるために非線形シンプレックス法を用いて、比硝化速度の実測値と(6)式の差が最小になるように最適化計算を行った⁵⁾。実測値は一週間に一度の水質分析結果と、DO、水温、pHの連続計測値の日平均である。その結果 $\mu_{max}=0.391$ 、 $\theta=0.01$ 、 $Z=0.748$ 、 $K_{pH}=7.58$ 、 $K_{DO}=2.29$ 、 $Y=0.123$ 、 $b=0.015$ 、 $X_0=335\text{mg}$ となった。 K_{DO} が高いのは、DOの計測位置が最終硝化槽であったためと考えられる。

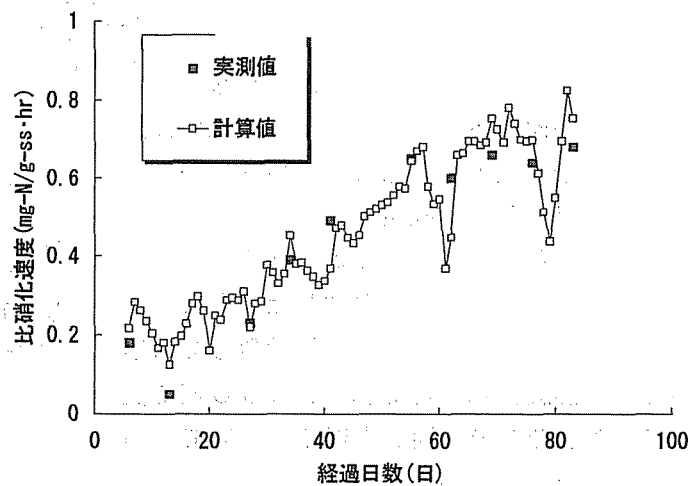


図6 比硝化速度の計算値と実測値

3.2で求めた K_{DO} (=0.312)が真の飽和定数を表すのに対し、ここで求めた K_{DO} 値はDO計の設置場所によって変化するので、管理上の飽和定数と位置づけることができる。

このモデル式と $Nit-R_r$ の測定値を使って次のような硝化反応の制御が考えられる。まずDO等の連続計測値と(5)式から μ を計算する。次に $Nit-R_r$ の測定値から硝化速度を推定し、(6)式に μ を代入しXを求める。これらの値を使って、流入 K_j -N負荷に対して硝化槽末端で硝化反応が完了するために必要なDOまたはSRTの設定値を出力する。また必要ならば両用槽の送風のON・OFFによる好気時間の制御を行う。

4. 制御システム例

R r 計を使った制御システム例を図7に示す。Nit-R r の値で硝化反応をモニターし、D O 及びS R T を最適に制御する。また、硝化槽前段でのD O 律速を最小限に制御するためにD O 計測の位置を前段にも設けている。このため後の好気槽での過曝気を防ぐため好気最終槽のD O 計測値を使った送風量制御も必要と考えられる。

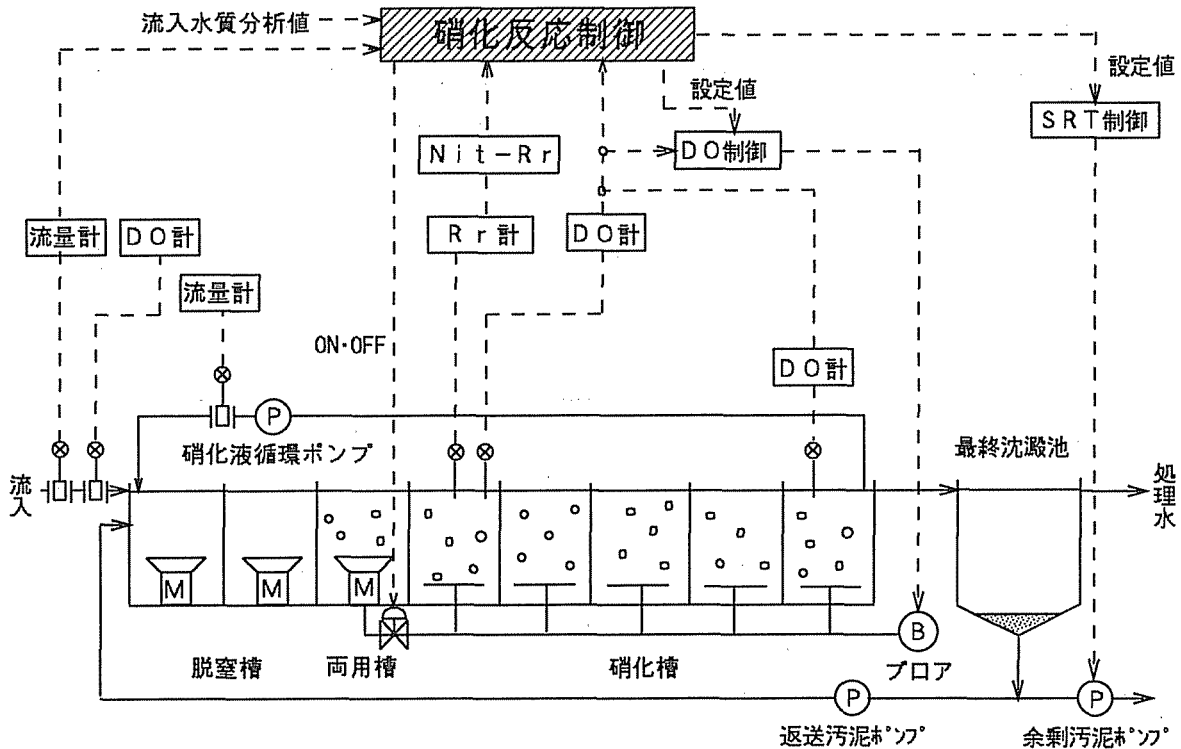


図7 制御システム構成図

5. 終わりに

循環法は下水の窒素除去法として今後ますます重要視されると考える。しかしながら環境変化や負荷変動に対する除去の安定化や省エネルギー等をめざした制御方法はまだ検討段階であると言える。本報告では硝化反応制御に呼吸速度計が利用できる可能性について述べた。今後は実用化に向けてさらに検討を続ける所存である。

参考文献

- 1) 市川、渡辺、小西、和田：活性汚泥循環法の除去効率化、用水と廃水、Vol. 36, No. 6, pp. 5-10(1994)
- 2) 橋本、岩堀、細川：呼吸速度を指標にした包括固定化活性汚泥法の動力学解析、下水道協会誌論文集、Vol. 30, No. 364, pp. 108-116(1993)
- 3) 佐藤、関根：新型呼吸速度計、明電時報、No. 211、pp. 6-9(1990)
- 4) US-EPA: Process Design Manual for Nitrogen Control, US-EPA Technology Transfer, (1974)
- 5) 井手、関根：定常解析を用いたパラメータ最適化法、第26回下水道研究発表会講演集、pp. 268-270(1989)