

呼吸速度計を利用した循環式硝化脱窒法の制御について

市川雅英*、小西隆裕*、久住美代子*
豊岡和宏*、和田信行**

*（株）明電舎製品開発研究所
東京都品川区大崎2-1-17

**（株）明電舎水処理技術部
東京都品川区大崎5-5-5

概要

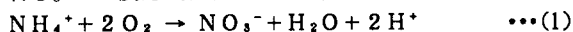
循環式硝化脱窒法を始めとする生物学的窒素除去法で窒素除去を行うためには、硝化菌の活性を維持することと生成された硝酸性窒素を効率的に脱窒させることが重要である。そしてそのためには、これらの反応状況をモニターする手段が必要である。そこで、活性汚泥の全呼吸速度と硝化抑制剤を添加した呼吸速度を測定し、両者の差から硝化菌の活性を推定できることを示した。そして同時に硝化に対する溶存酸素の影響を推定する方法も検討した。さらに実データを使って硝化反応のモデル式の妥当性を検討し、呼吸速度計と本式を使った硝化反応の制御方法を提案する。また呼吸速度計を利用して、脱窒槽の酸素収支を計算する手法を示し、硝化液循環量制御への適用性も検討した。本報告でこれらの内容を示し、さらに呼吸速度計を利用した循環式硝化脱窒法の制御システムを提案する。

キーワード

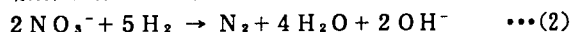
循環式硝化脱窒法、硝化菌、呼吸速度、硝化反応制御、循環量制御

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うことと、後段で生成された硝酸性窒素を前段に循環させ、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、硝化菌の活性を維持することと生成された硝酸性窒素を効率的に脱窒させることが重要である。そしてそのためには、これらの反応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¹⁾や計測器の開発²⁾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DOと略す）の影響を推定する方法を検討した。また脱窒反応に対するDOの影響を考慮して、呼吸速度計の硝化液循環量制御への適用性も検討した。以下でその内容について報告する。

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BOD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BOD除去当たりの必要酸素量、 t : 時間

a_N : 単位アンモニア性窒素除去当たりの必要酸素量

L : BOD濃度、 N : アンモニア性窒素濃度

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DOの経時変化を測定することで得られる。この測定例を図1に示す。初期DO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DO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DO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(mgO₂/l・h)となった。

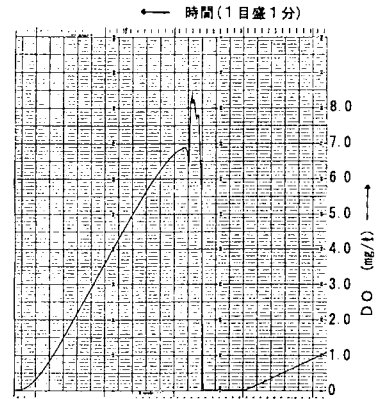


図1 R_r の測定例

次にアリルチオ尿素(ATU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、BOD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2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(mgO₂/l・h)となった。

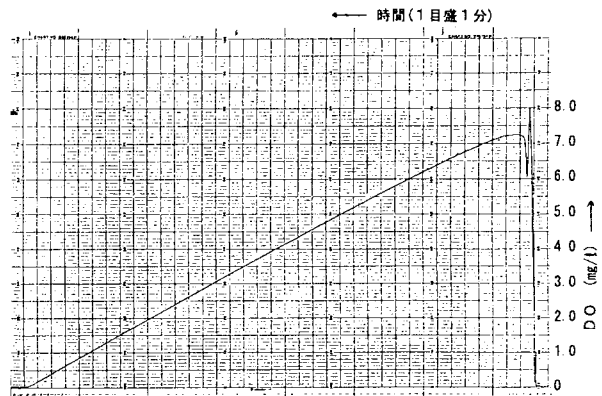


図2 ATU- R_r の測定例

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、

$$\begin{aligned} \text{Nit-}R_r &= [R_r] - [\text{ATU-}R_r] \\ &= 41.9 - 13.0 = 28.9 (\text{mgO}_2/\text{l} \cdot \text{h}) \quad \dots (4) \end{aligned}$$

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モル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モル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3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。

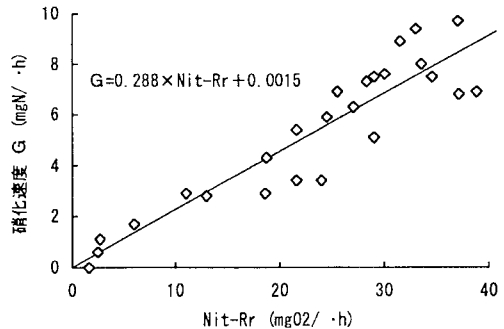


図3 Nit- R_r と硝化速度の相関

3.2 硝化反応のDO律速の推定

硝化速度 G (mgN/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。

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

ここに、 G_{max} =最大速度(mgN/l・h)、 K_{do} =飽和定数(mg/l)

このように硝化速度はD Oが低くなるにつれて急速に低下し、逆にD O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Kdo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D O値におけるNit-R rを測定することでKdoを推定することができる。前述したようにR rはD O変化曲線のある範囲で直線近似して求めているが、詳細を見るとそれぞれD O値で変化している。そこで、図1と図2において、異なるD O値での接線の傾きを求めた(実際にはD O±0.2(mgO₂/l·h)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D OとNit-R rの相関と回帰式による曲線を図4に示す。

表1. DOとR_r、ATU-R_r、Nt-R_rの関係

DO (mg/l)	5.5	4	3	2	1	0.5
R _r (mgO ₂ /l·h)	41.4	42.1	42.1	40.0	36.9	30.0
ATU-R _r (μ)	12.5	12.6	12.8	13.0	13.0	13.3
Nt-R _r (μ)	28.9	29.5	29.3	27.0	23.9	16.7

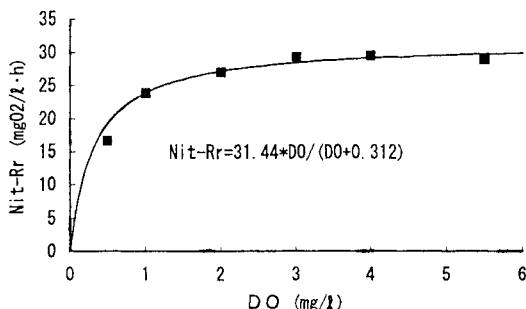


図4 DOとNit-R_rの相関

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³²⁾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⁴³⁾。

$$\mu = \mu_{max} \cdot (\exp(\theta(t-15))) \cdot [1 - 0.833(7.2 - pH)] \cdot \frac{DO}{DO + Kdo} \quad \dots (5)$$

ここに、μ：比増殖速度(1/d)

μ_{max}：最大比増殖速度(1/d)

θ：温度係数(-)、Kdo：飽和定数(mg/l)

比硝化速度J (mgN/gss·h)は(6)式のようになる。

$$J = (\mu_N \cdot X_N / Y / Vt) / X_M / 24 \quad \dots (6)$$

ここに、X_N：硝化菌量(mg)、Y：硝化菌収率(-)

X_M：汚泥濃度(g/l)、Vt：反応槽容積(l)

硝化による1日の硝化菌の増殖量DX_N(mg)は流入窒素の60%が硝化された時を最大とすると(7)、(8)式で計算される。

$$DX_N = \mu \cdot X_N \cdot (Vo / Vt) \quad TN \cdot Q \cdot 0.6 \cdot Y > \mu \cdot X_N \cdot (Vo / Vt) \quad \dots (7)$$

$$= TN \cdot Q \cdot 0.6 \cdot Y \quad \quad \quad \quad \quad < \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \dots (8)$$

ここに、Vo：硝化槽容積、TN：流入窒素濃度(mg/l)、Q：流入量(l/d)
系内の硝化菌量X_{NEW}(mg)は(9)式で表される。

$$X_{NEW} = X_N + DX_N - X_N / SRT - X_N \cdot b_N \quad \dots (9)$$

ここに、SRT：汚泥滞留時間(d)、b_N：硝化菌の自己分解係数(1/d)

上式のμ_{max}、θ、Kdo、b_Nの各パラメータと初期硝化菌量を求めるために非線形シフト法を用いて、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⁵³⁾。実測値は一週間に一度の水質分析結果と、D O、水温、pHの連続計測値の日平均である。その結果、μ_{max}=0.514、θ=0.01、Kdo=2.01、b_N=0.1、菌量=123mgとなった。Kdoが高いのは、D Oの計測位置が最終硝化槽であったためと考えられる。3.2で求めたKdo (=0.312)が真の飽和定数を表すのに対し、ここで求めたKdo値はD O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。まづD O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_N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D O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。

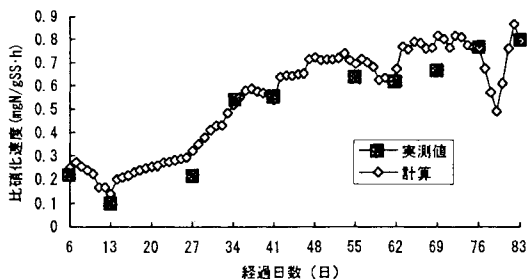


図5 比硝化速度の計算値と実測値

4. 呼吸速度を指標にした循環量制御

硝化と脱窒の各反応が100%起こると仮定すると、その窒素除去率Eは硝化液の循環比 α と汚泥返送比 β （共に流入水量比）と活性汚泥中に取り込まれる窒素の割合 γ で決まり、次式で表される。

$$E = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{1 + \alpha + \beta} \quad \dots (10)$$

(10)式から、循環比を上げると除去率は高くなるが、硝化槽からの溶存酸素の持ち込みが大きくなり、脱窒槽で無酸素状態が保てなくなると脱窒速度は低下する。またこの無酸素状態は、流入負荷量や活性汚泥量や水温等にも影響される。特に雨水が流入する処理場では降雨時の流入水の溶存酸素の持ち込みの影響は大きい。そこで脱窒槽の酸素収支を考慮してRr測定による循環量制御を考える。

脱窒槽におけるDO収支式は、返送汚泥のDOを0として考えると次式で表される。

$$Q(\alpha \cdot C_{o,n} + C_{o,r}) = Q(1 + \alpha + \beta)C_{o,s} + Rr \cdot V \quad \dots (11)$$

ここに、 $C_{o,n}$:流入水DO、 $C_{o,s}$:脱窒槽DO、 $C_{o,r}$:好気最終槽DO、 V :脱窒槽容積
硝酸性窒素の収支式は脱窒槽で脱窒が完了すると仮定すると次式となる。

$$Q(\alpha + \beta) \cdot C_{n,i} (1 - E) = F \cdot X_n \cdot V \quad \dots (12)$$

ここに、 $C_{n,i}$:流入水総窒素濃度、 F :脱窒速度 (mgN/gss·h)

脱窒速度とDOの関係は次式で表される。

$$F = F_{max} \cdot \frac{Kda}{DO + Kda} \quad \dots (13)$$

(10)から(13)式を使って脱窒槽で脱窒が完了する循環比 α や好気槽のDOを決めることができる。特に脱窒槽のDOを0に管理する場合は(11)式から容易に求めることができる。

5 制御システム例

ATU-Rr計を使った制御システム例を図6に示す。Nit-Rrの値が硝化反応制御に使われ、汚泥全体のRrの値が循環量制御に使われる。また硝化反応制御では硝化槽前段でのDO律速を最小限に制御するためにDO計測の位置を前段にしている。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DO計測値を使った送風量制御も必要と考えられる。

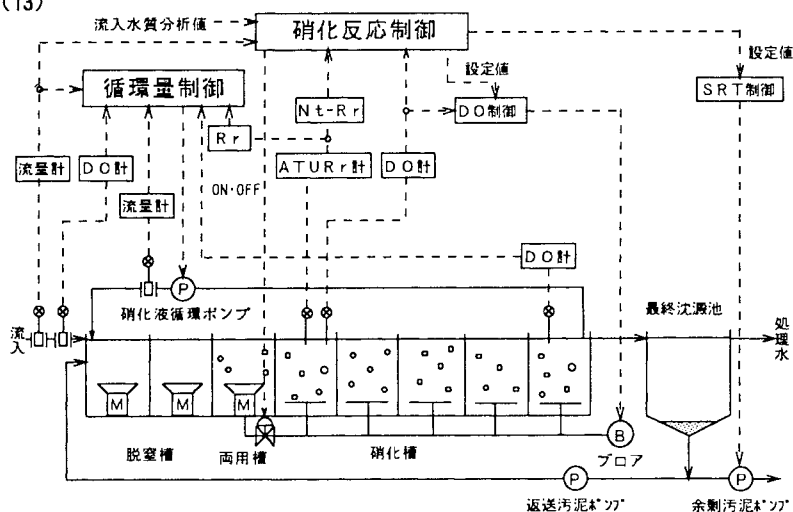


図6 制御システムの構成図

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DO計測値を使った送風量制御も必要と考えられる。

6. 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と脱窒の循環量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) 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)
- 2) 佐藤、関根：新型呼吸速度計、明電時報、No. 211, pp. 6-9(1990)
- 3) 市川、渡辺、小西、和田：活性汚泥循環変法の除去効率化、用水と廃水、Vol. 36, No. 6, pp. 5-10(1994)
- 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(1999)