

硝化を指標した最適DO操作に関する研究

細明電舎 ○関根 孝夫 岩堀 恵祐 富士元 英二

国立公害研究所陸水環境研究室 稲森 悠平

1. はじめに

曝気槽内の溶存酸素(DO)濃度一定制御やSRT制御は、現在、実用化への試みがなされつつある。しかし、処理水質を省エネルギー的に長期間安定に維持するための最適設定条件は、まだ確立されるにはいたっていない。一方、活性汚泥や処理水質の状態を直接的に把握するための指標として汚泥容量指標(SVI)、呼吸速度(r_r)、硝化率(η)、酸化還元電位(ORP)¹⁾等が有効であるという報告もある。これらの指標は全て、曝気槽内における酸素消費と大きななかかわりをもつ硝化反応と深く関与していることが知られている。硝化菌の代謝反応を、活性汚泥処理する上で重要な管理指標としなければならないのは、①硝化反応が有機物の酸化に比べ酸素要求量が高いため、硝化反応の管理の程度いかんにより消費空気が大幅に違ってくる、②独立栄養細菌である硝化菌の増殖速度は、従属栄養細菌に比べて非常に小さいため、特にSRTの下限に有効であるなどの理由による。

そこで、本論文では硝化反応に着目し、この反応をDO制御システムに組込んだ場合、省エネルギー的に良好な処理水質を維持できるか否かを明らかにすることを目的として実験及びシミュレーションによる検討を行った。

2. DO設定値と曝気槽内DO分布特性

曝気槽内のDO分布は、押し流しの均一曝気の場合、代謝活性の大きい入口側ほど低く、内生呼吸段階の出口側にかけて徐々に増加してゆく(図1)。また、曝気槽出口(g点)でDO定値制御を行った場合、その設定値によってDO分布は全体的に上下に移行する。一方、DO濃度によるBOD除去や硝化反応速度定数への影響は、一般に、Monodの式(式-2、式-4)で示される。

$$\left(\text{炭素系} \right) \quad \frac{dL}{dt} = -K'_L \cdot X \cdot L \dots\dots\dots(1)$$

$$K'_L = \frac{K_L \cdot C}{K_{CL} + C} \dots\dots\dots(2)$$

$$\left(\text{窒素系} \right) \quad \frac{dN}{dt} = -K'_N \cdot X_N \dots\dots\dots(3)$$

$$K'_N = \frac{K_N \cdot C}{K_{CN} + C} \dots\dots\dots(4)$$

DO (mg/l)

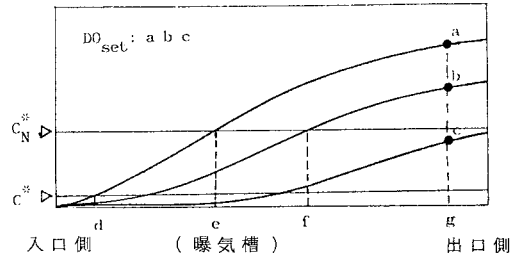


図1 DO設定値とDO分布特性

(3.1)で示すように、DO濃度による影響の強さを示す飽和定数は、窒素系(K_{CN})の方が炭素系(K_{CL})よりも大きく、したがって、臨界DO濃度(閾値)も図1に示すように窒素系(C^*_N)の方が炭素系(C^*)よりも高いことが予想される。例えば、DO設定値がaの場合、DO濃度の影響を受ける領域は、炭素系では入口からd点までなのに対して、窒素系ではe点までの広い範囲で律速を受けることになる。また、DO設定値がaからbに低下すると律速を受ける領域は、窒素系の場合、e点からさらにf点までの範囲に拡大する。このように、DOの分布状態により律速を受ける領域が変化、即ち、反応速度が変化することは、種々の外乱によって処理水質が目標値を逸脱した場合、DO設定値を操作することにより、処理水質を目標値に維持できる可能性を示唆し

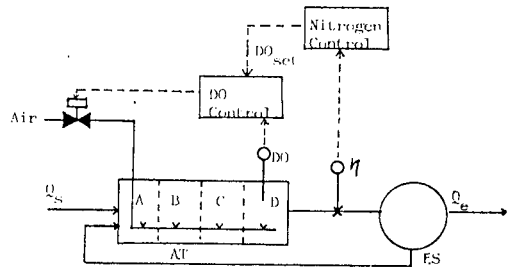


図2 硝化コントロールシステム

ている。以下、硝化率を指標にした最適DO設定値決定方法(図2)について検討する。

3. 実験と考察

3.1 DO設定濃度と硝化率の関係

本実験は、標準活性汚泥法で生活排水を主に処理している都市下水処理場で行った。曝気槽は、図2に示すようにA~Dの4回路に整流壁で分割されており、また、各回路への送風量は等しくなるように枝管バルブで調整した。

DO制御点はD回路とし、また、返送は定量(750 m³/h)、余剰はSRT制御(3.2参照)により1日1回引抜いた。

まず、SRT 6日、DO設定値 3 mg/lで約20日間運転し、MLSS濃度、処理水質が安定したのを確認後、DO設定値を3段階に変更し、曝気槽出口における溶解性COD、NH₄-N、NO₂-N、NC₃-N濃度の応答を調べた。

この結果を図3に示す。図3(a)に示すように、DO設定値が1 mg/l、3 mg/l、5 mg/lと高くなるに従い、A~D回路のDO濃度は全体的に上昇していることがわかる。

この結果、図2(c)に示すように、硝化率は、25~75%と大幅に変化した。一方、CODの除去率は、81~86%と設定DO濃度が1 mg/l以上でほとんど変化していない(図2(b))。

このように、炭素系と窒素系では、DO濃度による反応速度への影響が異なるが、これは、DO濃度による律速の強さを示す飽和定数の値からも推察される。図2(b)、(c)における実測値と計算値との比較による最小二乗法で飽和定数を求めた結果、K_{CL}(炭素系)は、0.2 mg/lであるのに対し、K_{CN}(窒素系)は、2.0 mg/lとDO濃度の影響を強く受けることが明らかとなり、硝化を指標にした制御(図2)が可能となることがわかる。

3.2 SRT制御と硝化菌濃度の推定

本実験は、SRT 6日で行ったが、図4にその制御システムを示す。

シミュレーション解析を行う場合、硝化菌の初期濃度は極めて重要である。通常、流入負荷量や処理水質が安定している場合、SRTをある値に設定して長期間運転すると、その設定値に見合った汚泥量が確保されるが、この方法を硝化菌量に適用し、次に示す物質収支より曝気槽出口の硝化菌濃度を推定した。

(系内汚泥量Mの変化)

$$\frac{dM_j}{dt} = G_j + M_{i,j} - M_{e,j} - M_{w,j} \dots\dots(5)$$

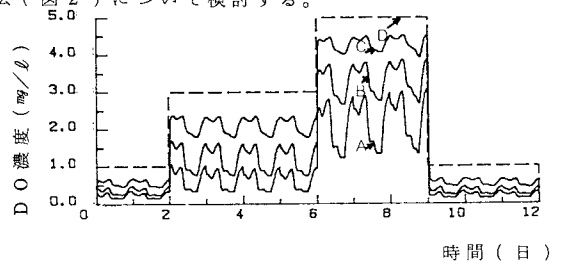
ここで、j = 1 : 有機物質化細菌

j = 2 : 硝化菌

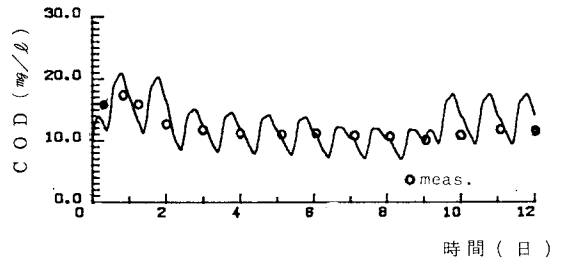
$$M_{w,j} = \frac{VA \cdot X_j}{SRT} \dots\dots(6)$$

$$G_1 = \frac{dX}{dt} = -Y_L \cdot \frac{dL}{dt} - K_d \cdot X \dots\dots(7)$$

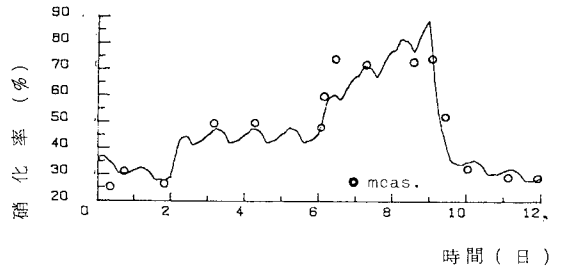
$$G_2 = \frac{dX_N}{dt} = -Y_N \cdot \frac{dN}{dt} - K_{dN} \cdot X_N \dots\dots(8)$$



(a) DO濃度



(b) 溶解性CODの応答(D回路)



(c) 硝化率の応答(D回路)

図3 DOのステップ変化と処理水質の応答

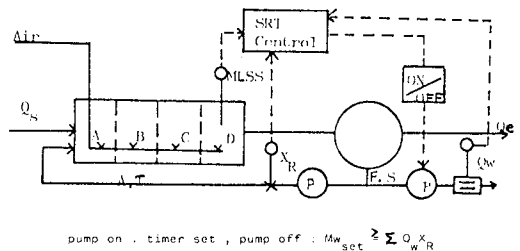


図4 SRTコントロールシステム

実験結果より、SRT 6日、DO 設定値 $3\text{mg}/\ell$ で 20 日間運転した場合、硝化率は平均 50% であった。そこで SRT 設定値 6日 で硝化率が 50% になるように硝化率一定制御 (3.3 参照) を長期間行えば、この条件下での最終的な硝化菌濃度を推定することが可能になる。

ここで、硝化率設定値 50%、硝化菌の初期濃度 $5\text{mg}/\ell$ で SRT 設定値をそれぞれ 5日、6日、10日 で 20 日間運転した場合の硝化菌濃度の経時変化を図 5 に示す。

この結果より、SRT 設定値が 5日、6日、10日 での硝化菌の最終値は、それぞれ $2.5\text{mg}/\ell$ 、 $2.8\text{mg}/\ell$ 、

4.1 mg/ℓ であることがわかる。

3.3 硝化率一定シミュレーション

シミュレーション解析は、硝化率の設定値と曝気槽 D 回路の硝化率の計算値との差から設定 DO 濃度の変化分を演算し、DO 制御回路へ出力するフィードバック制御方式とした。その制御フローを図 6 に示す。

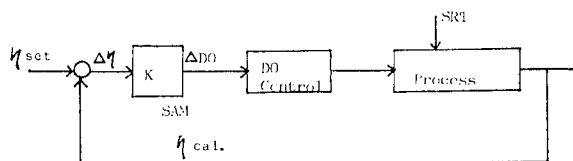


図 6 硝化率一定制御フロー

シミュレーションは、SRT 5日 で定常になっている状態から開始し、2日目に SRT 設定値を 10日 に変更した場合の DO 設定値の変化を調べることにした。比較のため、硝化率一定制御 (RUN 3、設定値 50%) の他に定風量運転 (RUN 1、設定値 $6000\text{Nm}^3/\text{h}$)、DO 定値制御 (RUN 2、設定値 $3\text{mg}/\ell$) も行った。

ただし、RUN 1~RUN 3 の 3 種類の運転方法におけるそれぞれの設定値は、SRT 5日 における一日当たりの送風量がほぼ等しくなるように定めた。

シミュレーション結果を図 7 (a)~(e) に示す。MLSS 濃度は、RUN 1~RUN 3 のどのような方法で運転しても COD 除去率があまり変化しないため、ほぼ同一の変化を示した (図 7 (b)) が、このような条件下での各操作条件における結果は次に示すとおりである。

定風量運転の場合は、SRT が長くなると MLSS 濃度は徐々に増加し (図 7 (b)) ているが、逆に DO 濃度は徐々に低下している。(図 7 (c)) ため、D 回路の硝化率や硝化菌濃度も徐々に低下している (図 7 (a)、(e))。SRT が長くなったにもかかわらず硝化率と硝化菌濃度が低下したのは、DO 濃度の低下による窒素除去速度の律速が生じたことによる。

また、DO 定値制御の場合は、SRT の変更時も制御点における DO 濃度は一定に制御されるため、硝化反応速度への DO 濃度による律速の強さはほとんど変化しない。このため、SRT の増加に伴い硝化菌濃度は徐々に増加し、その結果、硝化率も上昇している。

一方、硝化率一定制御の場合は、SRT 変更による硝

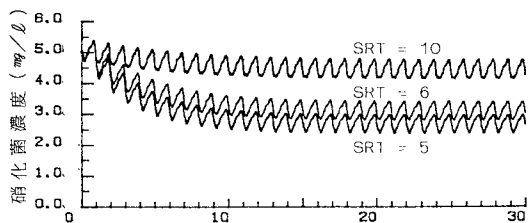


図 5 硝化菌濃度 (X_N) の経時変化

ここで、 K : ゲイン ($\Delta\text{DO} / \Delta\eta$: $0.88(\text{mg}/\ell)/\%$)

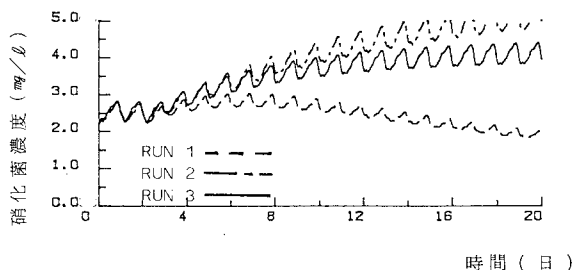
$\Delta\eta$ に対する不感帯 ($\pm 0.3\%$)

SAM: サンプルング周期 (30分)

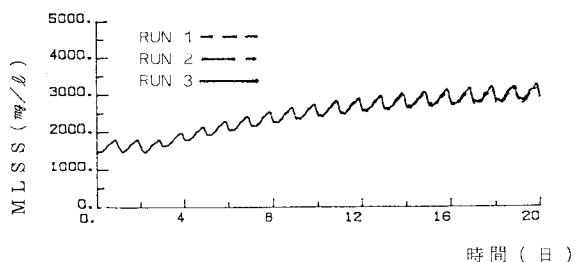
設定 DO 濃度上下限 ($0.5 \sim 6\text{mg}/\ell$)

送風量上下限 ($2000 \sim 20000\text{Nm}^3/\text{h}$)

η_{cal} : 硝化率 (D 回路)



(a) 硝化菌濃度の経時変化 (D 回路)



(b) MLSS 濃度の経時変化 (D 回路)

化菌濃度および硝化率の増加分だけ設定DO濃度を下げることにより硝化を抑制し、この結果、硝化率を目標値±5%に維持していることがわかる。

さらに、SRT 5日で硝化率の目標値を30%、70%とした場合の送風量の変化は図8に示すとうりである。これより、炭素系基質に比べNH₄-Nは、単位基質除去量当たりの必要酸素量が約2.5倍(a_N/a_L)であることから、硝化率の目標値によって必要空気量が大幅に異ってくる事がわかる。

4. おわりに

硝化は炭素系基質(COD除去)に比べDO濃度の影響を強く受けるため、反応状態の監視指標として有効である。また、硝化率の目標値の設定は放流先の環境および省エネルギーの視点から極めて重要であり、今後も微生物学的観点にたつた検討が十分なされる必要があるといえる。

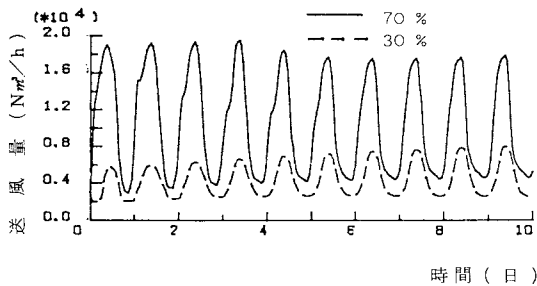


図8 硝化率設定値と送風量

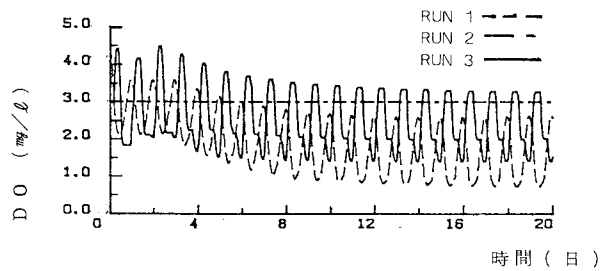
(使用記号)

L: 炭素系基質(COD)濃度(mg/l)、N: アンモニア性窒素濃度(mg/l)、X: M L S S濃度(mg/l)、X_N: 硝化菌濃度(mg/l)、X_R: 返送汚泥濃度(mg/l)、C: 溶存酸素濃度(mg/l)、K_L: 炭素系基質除去に関する反応速度定数(0.5 × 10⁻²(mg/l)⁻¹(d)⁻¹)、K_N: NH₄-N除去に関する反応速度定数(1.48(d))、Y_L: 収率係数(炭素系)(1.7 mg-X/mg-COD)、Y_N: 収率係数(窒素系)(0.05 mg-X_N/mg-NH₄-N; 文献値²⁾)、K_d: 自己酸化速度定数(0.08(d)⁻¹)、K_{dN}: 硝化菌の自己酸化速度定数(0.05(d)⁻¹; 文献値²⁾)、K_{CL}: 飽和定数(炭素系)(0.2 mg/l)、K_{CN}: 飽和定数(窒素系)(2.0 mg/l)、a_L: 単位炭素基質除去量当たりの必要酸素量(1.86 mg-O₂/mg-COD)、a_N: 単位NH₄-N除去量当たりの必要酸素量(4.57³⁾ mg-O₂/mg-NH₄-N)、M_i: 流入SS量(Kg/d)、M_e: 処理水SS量(Kg/d)、M_w: 余剰汚泥量(Kg/d)、η: 硝化率(%) $\eta = \left(\frac{NO_3-N}{NO_3-N+NH_4-N} \right) \times 100$ (D回路) (参考文献)

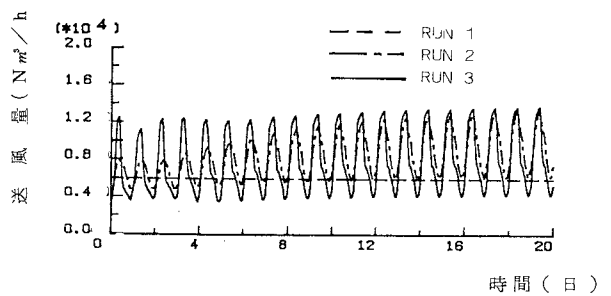
1) 岩堀、関根、富士元: 活性汚泥プロセスの酸化還元電位と硝化反応について、第20回下水道研究発表会、(1983)

2) Poduska, R. A.: A Dynamic Model of Nitrification in the Activated Sludge Process, Ph. D. thesis, Clemson Univ., S. C. (1973)

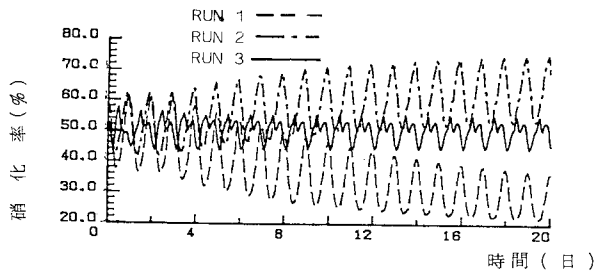
3) Tanthapanichakoon, W., Himelblau, D. M.: Simulation of a Time Dependent Activated Sludge Wastewater Treatment Plant, Water Res., 15(9), 185(1981)



(c) DO濃度の経時変化(D回路)



(d) 送風量の経時変化(D回路)



(e) 硝化率の経時変化(D回路)

図7 送風量制御方式と状態量の変化