

連続路による好・嫌気帯循環システムによる
下水処理，脱チッ素について

○ アタカ工業(株) 正員 中村 豊
大阪工業大学 正員 上木 紀夫
大阪工業大学 正員 木原 敏

はじめに： 近年、我国の下水道事業の主体は大都市大規模型から、地方都市中小規模型に移行してきた。それに伴い欧米諸国を中心に発展してきたオキシデーションデイチッ法（OD法）の見直しが各方面で行われ、各種OD法の開発および導入が相次いでいる。また、現在、計画中の中小規模下水処理施設にOD法を採用している例も少ない。

一方、我国の公共水域は汚染源の複雑化に伴い、特に閉鎖性水域の富栄養化問題が顕在化しつつあり、各方面で窒素・リンの規制が開始され始めている。したがって、維持管理が容易で維持・建設費の低廉な処理方式で、BODだけでなく、窒素・リンを除去できる方法が望まれている。

そこで、筆者は連続循環型であるOD法に着目し、これにDOを制御して一部に嫌気域を発生させ、BODの除去とともに硝化脱窒を同時に行う、硝化脱窒無終端水路方式(Nitrification Denitrification Endless Channel System, NDEC)を考えた。この方式は従来のOD法と異なり、流路のある箇所で制御した酸素を供給するため、水路の流れ方向にDOの分布消長が明確になり、好気性域、嫌気性域（Anoxic）の区分を生じる。この方式は最近、各地で実用化されはじめた、循環ばっ気法に比べて、循環比を極めて高くすることができ、高い窒素除去率を期待できることと、希釈によって原水の変動に対しても対応性が優れている特徴をもっている。

本報告は、NDECシステムにおけるBOD除去および硝化脱窒の動力学をモデルについて検討し、若干の試算を行ったものである。なお、本システムに関する実験も開始したので、その一部についても報告する。

1 動力学式

ここでは、槽内を好気性域と嫌気性域に分けて考え、好気域では $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化とBODの除去を、また嫌気域では $\text{NO}_3\text{-N}$ の還元による脱窒とその時に消費されるBODの減少について考える。

(1) BOD除去および硝化、脱窒式

好気性域におけるBOD除去は次式で示される。 $dL/dt = k \cdot S_L \cdot L$ (1)

k : BOD除去速度 (1/hr), L : BOD濃度 (mg/l), S_L : 消化菌を除いた汚泥濃度 (mg/l), $k(T) = k(20^\circ\text{C}) \times 1.065^{(T-20)}$
 $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化速度は $q_N = \frac{\hat{\mu}_N}{Y_N} \left(\frac{N}{K_N + N} \right) \left(\frac{DO}{K_{O_2} + DO} \right) \{ 1 - 0.833(7.2 - \text{pH}) \}$ (2)

q_N : 硝化速度 (g $\text{NH}_4\text{-N}$ /gVSS/day), N : $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 (mg/l), $\hat{\mu}_N$: 硝化菌最大増殖速度 (1/day), DO : 溶解酸素 (mg/l), Y_N : 硝化菌の生成量 (gVSS/g $\text{NH}_4\text{-N}$), K_N, K_{O_2} : $\text{NH}_4\text{-N}, DO$ に関する半飽和定数 (mg/l),

$$K_N = 10^{(0.051T - 1.158)} \dots\dots\dots (4), \quad \hat{\mu}_N = 0.47^{0.098(T-15)} \dots\dots\dots (5)$$

脱窒速度は次式で示される。

$$q_D = \frac{\hat{\mu}_D}{Y_D} \left(\frac{D}{K_D + D} \right) \left(\frac{L}{K_L + L} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 q_D : 脱窒速度 (g $\text{NO}_3\text{-N}$ /day), $\hat{\mu}_D$: 脱窒菌最大増殖速度 (1/day), Y_D : 脱窒菌の生成量 (gVSS/g $\text{NO}_3\text{-N}$), D : $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

(mg/l), L : BOD濃度 (mg/l), K_D, K_L : $\text{NO}_3\text{-N}, BOD$ に関する半飽和定数 (mg/l),

$\hat{\mu}_D/Y_D$ の温度の影響は次式で示される。

$$\frac{\hat{\mu}_D}{Y_D}(T) = \frac{\hat{\mu}_D}{Y_D}(20^\circ\text{C}) \times \theta^{(T-20)} = 0.07 \times 1.09^{(T-20)} \dots\dots\dots (7)$$

Yutaka NAKAMURA, Michio UEKI, Satoshi KIHARA

(2) 嫌気性域における動力学式

嫌気性域における動力学の基礎式を次に示す。

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -f_D \cdot S_D \quad \dots\dots\dots (8) \quad , \quad S_D = f_D \cdot S \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$f_D = \frac{\bar{Y}_b \cdot L_0}{Y_N \cdot N_0 + \bar{Y}_b \cdot L_0} \quad \dots\dots\dots (10) \quad \frac{\partial L}{\partial t} = K_1 \frac{\partial D}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\frac{\partial D}{\partial t}$: $\text{NO}_3 - \text{N}$ の除去速度 (mg/l/分)、 $\frac{\partial L}{\partial t}$: BOD の除去速度 (mg/l)、 S_D : 脱窒菌濃度 (mg/l)、

N_0, L_0, D_0 : $\text{NH}_3 - \text{N}$, BOD, $\text{NO}_3 - \text{N}$ の初期濃度 (mg/l)、 f_D : 脱窒菌の割合 (-)、 $\bar{Y}_b$: 単位 BOD 除去あたりの汚泥生成

量 (gVSS/gBOD)、 K_1 : 単位 $\text{NO}_3 - \text{N}$ を除去するのに必要な BOD 量 ($\text{gBOD/gNO}_3 - \text{N}$)、

式 (10) を積分して式 (6) に代入、その結果を式 (8) に代入、 $\text{NO}_3 - \text{N}$ に関する解は、

$$m_1 \left\{ D_0 - D + m_2 \ln \left(\frac{D_0}{D} \right) + m_3 \ln \left(\frac{m_5 + D_0}{m_5 + D} \right) \right\} = t \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{ここで、} n_1 = Y_D / \hat{\mu}_D \cdot S_D \quad \dots\dots\dots (12-1), \quad m_2 = K_D \cdot \frac{m_4}{m_5} \quad \dots\dots\dots (12-2), \quad m_3 = K_D + m_4 - m_5 - m_2 \quad \dots\dots\dots (12-3)$$

$$m_4 = \left\{ (K_L + L_0) / K_1 \right\} - D_0 \quad \dots\dots\dots (12-4), \quad m_5 = (L_0 / K_1) - D_0 \quad \dots\dots\dots (12-5)$$

BOD に関しては、式 (8) を (10) に代入

$$m_6 \left\{ L_0 - L + m_7 \ln (L_0 / L) + m_8 \ln \left(\frac{m_{10} + L_0}{m_{10} + L} \right) \right\} = t \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$m_6 = Y_D / K_1 \cdot \hat{\mu}_D \cdot S_D \quad \dots\dots\dots (13-1), \quad m_7 = K_L \frac{m_9}{m_{10}} \quad \dots\dots\dots (13-2), \quad m_8 = K_L + m_9 - m_{10} - m_7 \quad \dots\dots\dots (13-3)$$

$$m_9 = K_1 (K_0 + D_0) - L_0 \quad \dots\dots\dots (13-4), \quad m_{10} = K \cdot D_0 - L_0 \quad \dots\dots\dots (13-5)$$

(3) 好気性域における動力学式

好気性域における動力学の基礎式を次に示す。

$$\partial N / \partial t = -f_N \cdot S_N \quad \dots\dots\dots (14), \quad S_N = f_N \cdot S \quad \dots\dots\dots (15), \quad f_N = Y_N \cdot N_0 / (\bar{Y}_b \cdot L_0 + Y_N \cdot N_0) \quad \dots\dots\dots (16), \quad \partial DO_0 / \partial t = -K_r \cdot S \quad \dots\dots\dots (17)$$

$\partial N / \partial t$: $\text{NH}_4 - \text{N}$ の除去速度 (mg/l/分)、 S_N : 硝化菌濃度 (mg/l)、 f_N : 硝化菌の割合 (-)、

DO_0 : 初期 DO 濃度 (mg/l)、 K_r : 汚泥の酸素消費速度 ($\text{mgO}_2 / \text{mg/分}$)、

(3), (14), (15), (16), (17) は $\text{NH}_4 - \text{N}$ について同様

$$K_N \ln N + N = K_N \ln N_0 + N_0 - m_{11} \left\{ t + m_{12} \ln \left(\frac{m_{13}}{m_{13} - t} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (18), \quad m_{11} = \hat{\mu}_N \cdot S_N / Y_N \quad \dots\dots\dots (18-1)$$

$$m_{12} = -K_{O_2} / K_r \cdot S \quad \dots\dots\dots (18-2), \quad m_{13} = (K_{O_2} + DO_0) / K_r \cdot S \quad \dots\dots\dots (18-3)$$

好気性域における BOD は、(1) より $t = \frac{1}{K_2 \cdot S_L} \ln (L_0 / L) \quad \dots\dots\dots (19)$ または $L = L_0 \cdot \exp [-t \cdot K_2 \cdot S_L] \quad \dots\dots\dots (20)$

2 NDEC モデル

NDEC モデルの概念図を図-1 に示す。

無終端水路の A 点の直後に原水を投入し、B 点で酸素を供給する。B 点-A 点間は好気性状態となり、A 点から混合液を最終沈殿池へ引抜く。A 点-B 点間は嫌気性状態となる。好気域では BOD 除去と硝化が生じ、嫌気域では原水中の BOD を利用して脱窒が生じる。水路内循環流量を Q、流入原水量

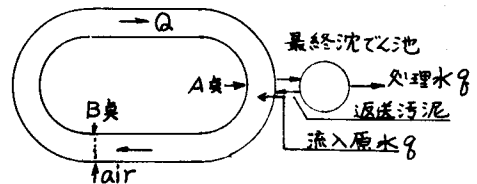


図-1 NDEC モデル

$$q \text{ とすると、A 点直後の水質は、} Q = Q_R + q \quad \dots\dots\dots (21), \quad L_A = (Q_R \cdot L_R + q \cdot L_0) / Q \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$N_A = (Q_R \cdot N_R + q \cdot N_0) / Q \quad \dots\dots\dots (23), \quad D_A = (Q_R \cdot D_R + q \cdot D_0) / Q \quad \dots\dots\dots (24)$$

3 NDEC モデルによる試算

(1) 試算に用いた各係数の値

$$Y_D = 0.9 \text{ (gVSS/gNO}_3\text{-Nrem)}, \hat{\mu}_D/Y_D = 0.07 \text{ (gNO}_3\text{-N/gVSS}\cdot\text{day (20}^\circ\text{C))} = 4.86 \times 10^{-5} \text{ (gVSS/min (20}^\circ\text{C))}, K_1 = 2.5, \\ K_D = 0.16 \text{ (mg/l)}, K_L = 0.10 \text{ (mg/l)}, \bar{Y}_b = 0.55 \text{ (g/g BODrem)}, Y_N = 0.15, k = 1.66 \times 10^{-5} \times 1.065^{(T-20)} \text{ (1/min)}, \\ KO_2 = 1.0 \text{ (mg/l)}, K_r = 8.0 \text{ (mg/g}\cdot\text{hr)} = 1.33 \times 10^{-4} \text{ (g/g}\cdot\text{min)}$$

(2) 試算結果

試算結果の例を図-2~4に示す。

4 考察

(1) 試算結果

図-2に、定常状態における水路内の水質を示しているが、希釈効果のため濃度差はあまりなく、処理水は水路のどの点から取り出してもよいことがわかる。

図-3は、循環回数・水路長

・初期D0に関する試算であ

るが、あまり短くなると初

期D0を高くできず、窒素の除去率は低下してきている。

(2) 実験

パンチスケール実験に用いた装置の概要を図-5に示す。

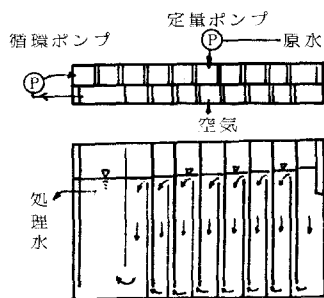


図-5 NDEC実験装置

この装置は容量約120 (1) で、槽内のD0分布は供給する空気量で調

節した。処理性能、D0分布等を測定したが、実験結果の詳細は当日報告する。また、実プラントのOD槽を本方式に改造し、昭和56年より駆動しており、そのデータより試算に用いた係数の見直しも含めて再度検討して後日報告する。

5 結論

NDECシステムのモデルを考え、動力学式を組み立てて試算を行なった結果、本方式の特徴として次のような点がわかった。

(1) 本方式は、従来の二次処理施設程度の設備でBODだけでなく窒素も充分除去できることがわかった。

定常状態では窒素の除去率は約90%となる。

(2) 従来、ばっ気槽ではD0が存在すればよいと言われてきたが、むしろある程度制限を加えた方が処理効果があが

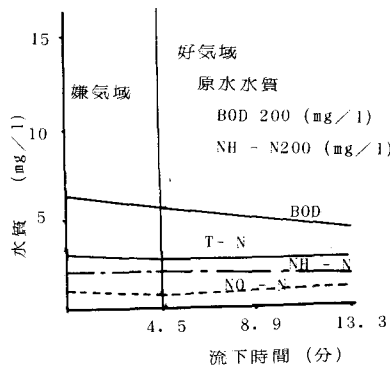


図-2 水路内水質分布

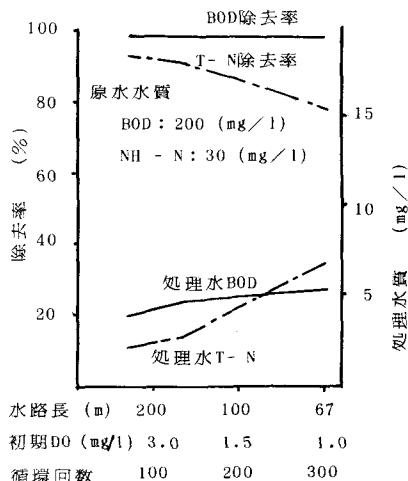


図-3 水路長と処理性能

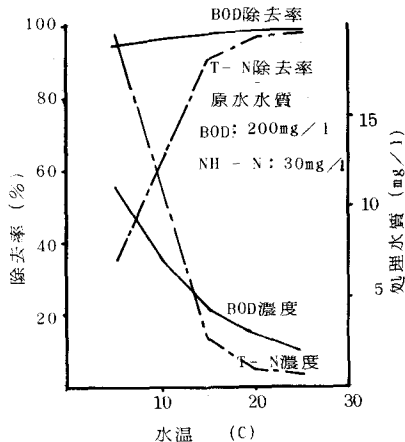


図-4 水温と処理性能

る。

- (3) 本方式は、負荷の変動に対し対応のし易い方式である。すなわち、負荷ショックに対しても安定した処理水を期待することができる。
- (4) 負荷ショックに強だけでなく、流入量の変化に対しても適応性を有している。流入量の変化は循環量が一定であれば、循環率として影響を与えるが、循環率の変化によっても、水質は大きな影響を受けない。
- (5) 従来のOD法では通常、用いられる滞留時間は24(hr)以上であり、水深に制限があるところから、広い敷地面積を要求する。NDECシステムでも、循環率が100回ともなれば、同様の容積を要するが、ディッチのような水平流から、今回の実験のような垂直流を組み込んだ方式では、水深を大きく採ることも可能であるので、敷地面積を小さくすることができる。したがって、都市化の進んだ用地取得の困難な地域にも適用が可能になる展望がある。
- (6) 汚泥を安定して確保することが、この方式の重要課題であるが垂直流を組み込むことによって、汚泥濃度を保留することに有利な条件をつくる可能性もある。目下その方式について、検討を行いつつある。この方法によれば、さらに安定した処理効果を期待することができ、また場合によっては、容積を合理化することも可能になる。
- (7) 従来、好気性、嫌気性の2槽を用いた循環方式の提案があるが、この方式ではそれぞれの槽は、ほぼ完全混合に近く、嫌気槽へ流入する好気槽のD0を下げることができず、嫌気槽を安定した嫌気性(Anoxic)に保持するためには槽系内のBOD負荷を余り小さくすることができなかった。したがって循環回数のある程度犠牲にしなければならず、循環・希釈効果も減殺せざるを得なかった。しかし、本法では流下にしたがいD0を漸減して、Anoxicに至らしめるので、Anoxicの状態が安定しているのが、特徴である。このため、従来の循環型に比して、極めて大きい循環率を確保することができる。このことが、安定した処理水質を確保するのに卓越して効果があるのである。
- (8) しかし、負荷の変動に伴い、D0が消失し、Anoxicになる境界はある幅で移動する。負荷の変動が大きい程、その移動幅もまた大きい。この現象が処理水の変化に及ぼす影響は少ないが、流入・流出点を合理的に決定するための設計理論上、興味ある問題である。今後この点についての吟味を加えなければならない。
- (9) 沈でん汚泥の発生が極めて少ない。したがって汚泥処理は場合によつては天日乾燥でもよく、汚泥処理の特別な施設を要しない。
- (10) このシステムの目標は、維持管理の容易さに加えて、高率的な窒素除去にある。維持管理には水質が安定しているので、特別な調整を要しない。特にポンプシステムにトラブルがない限り、運転は支障ない。したがって無人化も可能である。(実施例では無人である。)
- (11) 設備に複雑な構造を要しない。循環システムと空気の圧入のみである。負荷変動に対して、通常は循環水量、空気量共変化の必要はないから、これらの制御は定点固定制御でよい。
- (12) トラブルによって、流入がストップした場合、または、間けつ運転を行った場合は、流入、出点が接近していると、短絡流を生じることが考えられる。流入、出点を対向部に設置する等の配慮をすることが要るかも知れない。これらについても今後の課題としたい。

6 はわりに

今回の報告は主として試算が中心であり、実測値をさらに積んで、報告したい。

本研究は、大阪工業大学 上水工学研究室で行ったものであり、演算、実験に協力した、学生 岩井一浩、田中美鶴、早川 岳、大島理一、沖田洋一、西川寛章の各君に謝意を表する。また同 大学 川島 普、宇野源太両教授には、種々有益な御意見をいただいた。ここに感謝の意を表する。その他、アダカ工業(株)の各担当技術の各位にも御協力をいただいた。ここに合せて謝意を表する。