

立命館大学理工学部 正員 ○藤井滋穂
嶺南大学環境工学科 李 炳大

1. はじめに

嫌気好気循環法における窒素除去率は、その返送+循環比Rを用いた $100R/(1+R)$ によってしばしば検討されるが、本式では硝化・脱窒で制限因子となる水質因子、および活性汚泥による窒素摂取等の共存反応を考慮していない。本報ではこれらを考慮した理論的窒素除去率について検討する。

2. 理論解析の仮定条件

理論解析のため、次の仮定を行い現象を簡略化した。①関連水質は $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、アルカリ度、基質（基質は脱窒での減少COD分で表記）、DO。これらは予め生物増殖による変化を考慮して、無機化および硝化に寄与する濃度で与える。②好気（曝気）槽での基質の好氣的分解と硝化、嫌気（無曝気）槽での持込DOによる好気分解（優先）と脱窒のみを反応として考え、これらはいずれかの反応物質がゼロとなるまで進行。③水質値は、流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ に対する当量比（無次元）で与える。即ち、好気分解では基質1の減少でDO1減少（嫌気槽のみ）、硝化では $\text{NH}_4\text{-N}$ が1減少、アルカリ度が2減少、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が1増加し、脱窒では $\text{NO}_3\text{-N}$ と基質がともに1減少し、アルカリ度が1増加。④汚泥の内生呼吸による脱窒は無視。

3. プロセス内の水質変化

以上の仮定に基づき、同プロセスを図1のように簡略化した。図中■が与条件であり、 $a(=0.28 \times \text{アルカリ度}(\text{mgCaCO}_3/\text{L})/\text{NH}_4\text{-N}(\text{mgN}/\text{L}))$ 、 $b(=0.35 \times \text{基質}(\text{mgCOD}/\text{L})/\text{NH}_4\text{-N}(\text{mgN}/\text{L}))$ は流入水質因子に、R（返送率と循環率の和）及びD（ $=0.35 \times \text{好気槽端DO}(\text{mgO}/\text{L})/\text{流入NH}_4\text{-N}(\text{mgN}/\text{L})$ ）は操作因子に相当する。図中の式はこれらと嫌気槽での好気分解量 m_0 、脱窒量 m_1 、好気槽での硝化量 m_2 を用いて物質収支から得たものである。

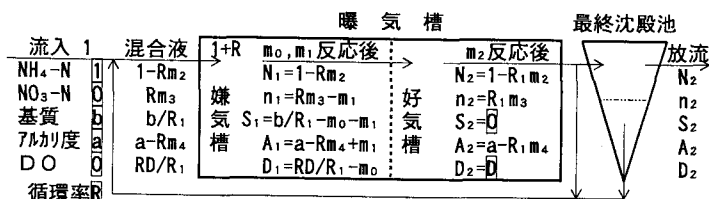


図1 嫌気好気循環法の設定および計算水質濃度
注) $R_1=R+1$, $R_2=R+2$, $m_3=m_2-m_1$, $m_4=2m_2-m_1$; m_0, m_1, m_2 は反応量

4. 反応パターン

本プロセスでは嫌気槽で嫌気化未了か $\text{NO}_3\text{-N}$ 残存か $\text{NO}_3\text{-N}$ 消失か、好気槽の律速因子が $\text{NH}_4\text{-N}$ かアルカリ度かで、表1に示す6ケースが生じる。図1の $m_0 \sim m_2$ は表中の式条件(等式)を連立して解くことで、各ケースについて算出でき、これらを同不等式に代入して得たのが“a, b条件”である。循環率Rと終端DO強度Dとを固定した場合、流入水の基質及びアルカリ度の対 $\text{NH}_4\text{-N}$ 比a, bによって、生じるケースが異なり、図2（例: $R=5, D=0.1$ ）のようなパターンとなる。一般にアルカリ度当量比aが2以下では硝化が未了（Case 2, 4, 6）に、基質当量比bが1以下では脱窒が未了（Case 3~6）になる。

表1 各反応パターンとその流入条件および除去率

Case	反応パターンと式条件		a, b (=b-DR) 条件	除去率 (-)	
	嫌気槽	好気槽		T-N	$\text{NH}_4\text{-N}$
1	脱窒完了	* 硝化完了	$R/R_1 < b_1$, $R_2 < a$	R/R_1	1
2	$n_1, D_1=0, S_1>0$	**硝化未了	$aR/R_2 < b_1$, R_1	aR/R_2	aR_1/R_2
3	脱窒未了	* $N_2=0, A_2>0$	$0 < b_1 < R$, $2-b_1 < a$	b_1	1
4	$S_1, D_1=0, n_1>0$	** $A_2=0, N_2>0$	$a < 2-b_1$	0	$(a+b_1)/2$
5	DO残存	*	$b_1 < 0$, $2 < a$	0	1
6	$S_1, n_1>0, D_1=0$	**	$a < 2$	0	$a/2$

5. 領域分割

D一定の場合、同じ水質組成でもRの値により生じるケースは変化するが、a, bの範囲によってその変化パターンは定まり（表2）、図3に示すZone A~Cの3領域に分割できる。Zone Aでは、Rが小さいとき脱窒硝化とも完了するCase 1であるが、その増大で嫌気槽での持込DOの影響が強まり、脱窒未了（Case 3）、最後

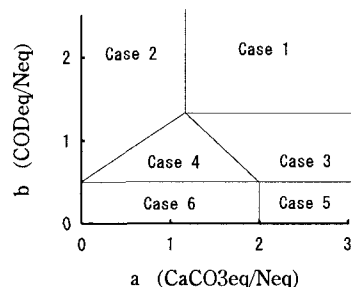


図2 流入水質の反応パターンへの影響

には嫌気状態も維持できなる (Case 5)。Zone Bでは、Rが小さすぎても大きすぎても、脱窒に伴うアルカリ度回帰量不足が影響し、硝化が未了となる場合 (Case 2, 4) がそれに加わる。Zone B, Cの境界はDの値により若干変化するが、日本の下水処理場流入水では、図3のプロット (第27, 28下水協年講等より、全国各地7処理場) のように、すべてZone AかBに属すると思われる。

6. 循環率Rの影響および最適解

つぎに各ケースごとに算出した $m_0 \sim m_2$ を図1の n_2, N_2 の式に代入し求め、最終的な窒素除去率をa, b, R, Dで表した (表1)。

そして各Zoneごとに、Rの変化に対応するケースを求め、除去率に対するRの影響を検討した。一例としてZone Bの結果を図4に示す。T-Nでは、各Zoneとも循環率Rの上昇とともに脱窒量が増大し、丁度嫌気槽で NO_3-N , 基質がともに0となる時点 (Zone A, B: Case 3→1, Zone C: Case 2→4) で最大となったのち、持込DOの影響増大のため減少する。表2に示すように最大T-N除去率とそのRは、Zone Cではa, b, Dの関数であるが、Zone A, Bはb, Dのみとなり、しかも同じ式となる。 NH_4-N では、Zone Cで100%とならず、Zone B, Cで最適のR値が存在する。流入の NH_4-N , 無機化CODが各28, 96mg/L, 曝気槽終端 DO_3 2mg/Lの場合 ($a=1.6, D=0.04$)、流入アルカリ度が80mg/L ($b=0.8$, Zone C) で3.2% ($R=21.7$)、160, 240mg/L ($b=1.6, 2.4$; Zone B, A) でともに94.3% ($R=16.4$, Zone B) となり、限界のT-N除去率があることがわかる。

7. 流入組成の検討

上記の式で利用するa, bは、硝化・脱窒の対象となる成分のみを考慮したものである。図5はその過程を模式化したものである。流入水の $DO, BOD, NO_3-N, NH_4-N, T-N$, アルカリ度が測定されている場合、まず、流入水の持込DO及び NO_3-N によって消費された後の残りのBODを $COD (=ThOD)$ に換算する。ついで $Org-N$ の脱アミノ反応を考慮し生成アルカリ度、 NH_4-N を算出し、最後に生物増殖の影響を考慮している。結果的にはこれで計算されるa, b値は単純に BOD, NH_4-N , アルカリ度から計算したものと類似の値となるが、場合により大きく異なる。

8. おわりに

本研究により、

①嫌気好気循環法でもRは単純に増加したら除去率が向上するのではなく、除去率には限界値、Rには最適値がある。②これらの値は、流入水質組成および曝気槽DOに応じた領域で式形が異なり、図3の領域に分けて考える必要がある。その値は表2で与えられる。③硝化脱窒以外の流入 DO, NO_3-N , 脱アミノ反応、生物増殖の影響は図5の式で補正可能。などの成果を得た。本理論はすでに報告された研究例で検証しうる。

表2 各Zoneの変化パターンと最大除去率

Zone	Case変化パターン (R:0→∞)	除去率[必要R]
A	1→3→5	T-N b-X/2 [X/2D]
B	2→1→3→4→5	$\begin{bmatrix} [C] \\ [2-a] \\ [a-1] \end{bmatrix}$
C	2→4→6	$\begin{bmatrix} a-Y/2 \\ [b-a+Y/2] \end{bmatrix}$

注) $X=b-1-D+\{(b-1-D)^2+4bD\}^{1/2}$
 $Y=a-b-2D+\{(a-b-2D)^2+8aD\}^{1/2}$

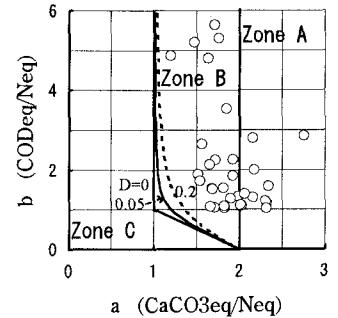


図3 日本の下水水質組成と各Zone

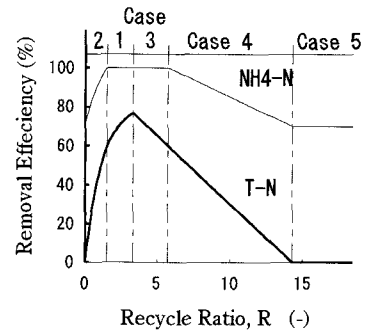


図4 循環率Rの除去率への影響
($a=1.4, b=1, D=0.07$)

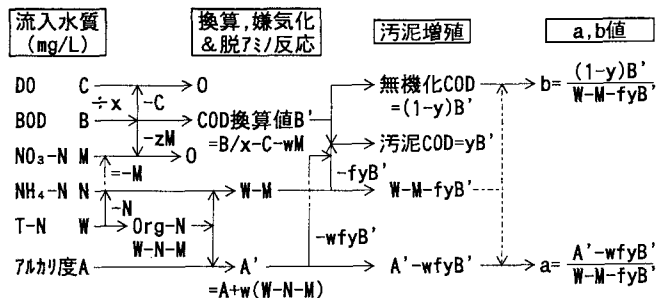


図5 測定流入水質からa, b値の計算方法概念図

注) x: BOD/COD比(-), f: 活性汚泥のN/COD比, y: 汚泥の収率(-)
w: 窒素/アルカリ度等量比 (=50/14), z: NO_3-N の酸素当量比 (=40/14)