

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○ 田中 浩 正会員 宗宮 功
正会員 藤井滋穂 学生員 藤原 拓

1. はじめに

ステップフィード嫌気好気法（以下ステップ法）は、わずかな改良で既存施設の窒素除去向上が期待される方法で、筆者らはその最適ステップ率を化学量論に基づく理論解析^{1,4)}で検討してきた。その中で、好気槽からの持込 DO の影響が無視可能な場合^{1,4)}とアルカリ度十二分の場合^{2,3,4)}はすでに最適条件の解析解を提示した。本報告では、化学量論理論を基礎としつつ数値計算で条件等を検討することで、DO およびアルカリ度も反応に関与する場合の最適条件を考察した。

2. 最適条件および最大 T-N 除去率の理論計算方法

(1) 反応速度による各槽水質濃度表示

対象処理系は既報^{2,4)}と同様、図1の反応系であり、各濃度は化学量論解析のため流入アンモニアに対する当量比で与え、図中の記号で解析する。流入水のアルカリ度、基質濃度は a, b 、操作条件は、返送率 R 、ステップ率 r および N1, N2 槽 DO の d_1, d_2 であり、これらの条件と各槽反応量 m_1/r_2 等で各槽の水質値は表1のように表記可能である^{3,4)}。

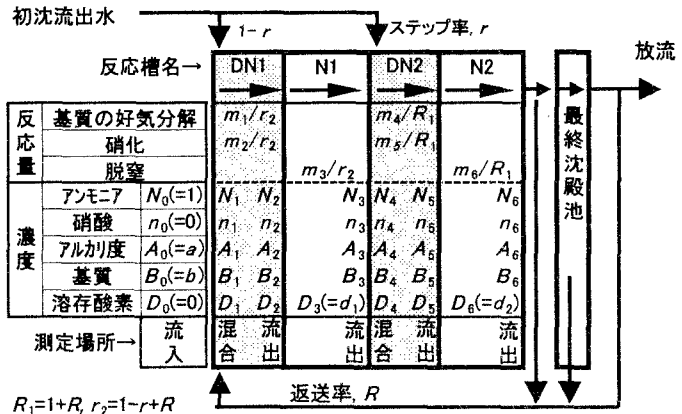


図1. ステップ法のモデルプロセスおよび各使用水質記号

表1. 反応槽各地点での水質濃度（流入水質、操作条件および反応量による表現） $R_1=1+R, r_2=1-r+R$

サックス	アンモニア, N	硝酸, n	アルカリ度, A	基質, B	DO, D
1	$1-R(R_1 m_3 + m_6)/r_2$	$R(-m_2 + m_3 - m_6 + R_1 m_6)/r_2$	$a + R(m_2 - 2m_3 + m_6 - 2R_1 m_6)/r_2$	$(1-r)b/r_2$	Rd_2/r_2
2	$1-R(m_3 + m_6)/r_2$	$[-R_1 m_3 + R(m_3 - m_6 + R_1 m_6)]/r_2$	$a + [R_1 m_3 + R(-2m_3 + m_6 - 2R_1 m_6)]/r_2$	$\{(1-r)b - m_3 - m_6\}/r_2$	$(Rd_2 - m_3)/r_2$
3	$1-(R_1 m_3 + R m_6)/r_2$	$[-R_1 m_2 + R_1 m_3 + R(-m_3 + m_6)]/r_2$	$a + [R_1 m_2 - 2R_1 m_3 + R(m_3 - 2R_1 m_6)]/r_2$	0	d_1
4	$1-m_3-Rm_6/R_1$	$-m_2+m_3+R(-m_3+m_6)/R_1$	$a-m_2-2m_3+Rm_6-2m_6/R_1$	rb/R_1	$d_1 r_2/R_1$
5	$1-m_3-Rm_6/R_1$	$-m_2+m_3-m_6+Rm_6/R_1$	$a-m_2-2m_3+m_6-2Rm_6/R_1$	$(rb-m_6-m_3)/R_1$	$(d_1 r_2 - m_6)/R_1$
6	$1-m_3-m_6$	$-m_2+m_3-m_6+m_6$	$a-m_2-2m_3+m_6-2m_6$	0	d_2

(2) Case 分類 各反応量は、その律速因子がゼロとなるまで完全に進む仮定^{1,4)}で算出可能である。律速因子には脱窒槽では硝酸、基質、DOの3者が、好気槽ではアンモニア、アルカリ度の2者があり、結局出現パターンは表2に示す $36(=3 \times 2 \times 3 \times 2)$

Case が考えられる。これら Case の一部は既に一般解を算出しているが^{2,4)}、本研究では残りの Case でもその解($m_1 \sim m_6$)を求めた。結果の一例として Case7 の場合を表3に示す。なお律速とならない水質は非負であり、これが各 Case 出現の条件となる。

表2. 律速因子に基づくCase分類 表3. Case7が生じるための条件

DN	1	2	N1	2	Am	AK	Am	AK
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	9	10	11	12	13	14	15	16
3	17	18	19	20	21	22	23	24
4	25	26	27	28	29	30	31	32
5	33	34	35	36				

Am: アンモニア, AK: アルカリ度

$$\begin{aligned}
 &2Rd_2R_1 + R^2 + 2R + 2Rrb - (aR + 2b)r_2 > 0 \\
 &-3a(R+1) + 3R - ar + 4 > 0 \\
 &r_2(a + 2d_1) - 2rb - R > 0 \\
 &-r_2a + R - 2r + 2 > 0 \\
 &m_1 = Rd_2 \\
 &m_2 = 1/2R(-ar_2 + R + 2)/R_1 \\
 &m_3 = 1/2(a - ar + R - R) \\
 &m_4 = d - d_1r + d_1 \\
 &m_5 = m_2 \\
 &m_6 = 1 - 1/2(r_2 + R)
 \end{aligned}$$

Hiroshi TANAKA, Isao SOMIYA, Shigeo FUJII, Taku FUJIWARA

(3) ステップ率の影響把握 すべてのケースで表3のような解を得たが、各 Case の生じる条件を定式化することが困難であった。そこで d_1, d_2, R の条件を固定し、特定の流入条件 (a, b) での r の影響を数値計算で求めた。すなわち、各 r ごとに 36 Case の条件をチェックし、条件を満たす唯一の Case について T-N 除去率 ($m_2 + m_3$) を求め、 r の関数として図化した。図2の例のように r の増加とともに T-N 除去率は一旦上昇し、その後低下した。最大値はほとんど図の例の Case 9 から 7 のように Case が遷移する時に生じている。このように、 a, b, d_1, d_2, R の条件が固定されれば、最大 T-N 除去を得るための最適ステップ率 r が算出できる。

(4) 最適操作条件 上記の計算を、 d_1, d_2, R の条件を固定し細かな流入条件 (a, b 各 0.02 刻み) のもとで実施し、最大 T-N 除去に必要な条件 (生じうる Case と r 値) を集約した。それらおよび最大 T-N 除去率を $a-b$ 座標上で表すことで最適運転管理に必要な条件を図3のように示した。

3. 結果の考察

図3 (a) は最大 T-N 除去率を示す時の Case 遷移パターンを示している。図中の Line1 より b が高い場合はいずれも Case 番号が 2 減少しており、DN2 で硝酸、基質とも消費され、DN2 での脱窒が最大となる条件にあたる。一方、 b が Line1 より低濃度側は Case 遷移が 12 の減少であり、DN1 での同様の運転が最適である。アルカリ度では、Line2 より a が低い場合は N1、N2 とともにアルカリ度が律速因子となっていることがわかる。さらに図3 (c) で流入アルカリ度が T-N 除去率に大きく影響を及ぼす領域と、Line2 左側とは一致することから、アルカリ度が高い場合、その影響はないが、低い場合はアルカリ度が T-N 除去率に大きく影響している可能性があることがわかる。

最後に持込 DO による影響であるが、影響を無視した従来の研究^{2,3)} に比べアルカリ度不足時の最大 T-N 除去に必要な r の値が 5% 程度小さくなる傾向が見られた。これは DN1 で持ち込み DO を消費し、かつアルカリ度を補うための基質が実際より低く見積もられていたものと思われる。また、基質が極端に不足する場合は新たに Case 17, 24, 29, 36 など嫌気槽で嫌気状態を作れない Case が生じ、DN2 での脱窒反応が起こっていないため T-N 除去率がさらに 3% 程度低くなった。

4. おわりに

数値計算を用いた解析により、ステップ法各反応槽で生物反応が理想的に進む条件下での最大 T-N 除去率と、そのときの最適操作条件を求めることができた。この手法はステップフィード内部循環法や、3 段以上のステップフィード嫌気好気法など、さらに複雑な処理法にも適用可能である。

参考文献 1) S. Fujii (1996), *Wat. Sci. Tech.*, 34, 459-466. 2) S. Fujii et al. (1997), *Proc., BNR Conf.* 3, 563-570. 3) 藤井ら (1998), 環境工学研究論文集, 35, 367-377. 4) 藤井ら (1997), H6-H8 科研基盤(C)研究成果報告書 (No. 06650611)

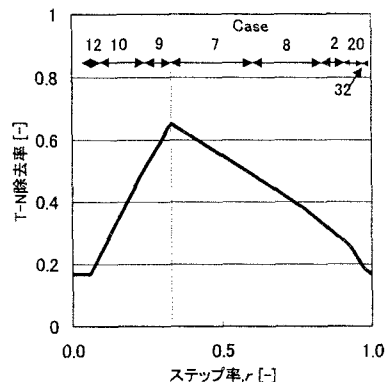


図2 ステップ率とT-N除去率の関係 ($a=2.0, b=1.5, R=0.25, d_1=0.1, d_2=0.2$)

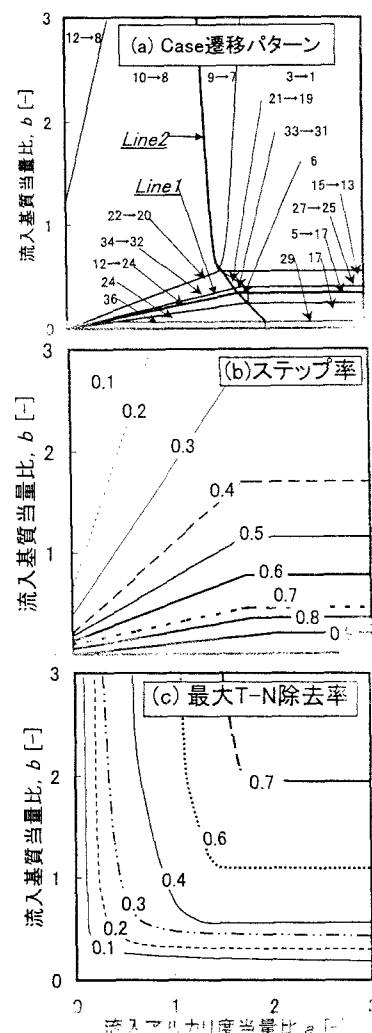


図3. 最大T-N除去を得るための Case とステップ率 ($R=0.25, d_1=0.1, d_2=0.2$)