

京都大学大学院 学生会員 ○半田大介\* 正会員 藤井滋穂\*

京都府 常岡信希\*\*

## 1. はじめに

ステップフィード嫌気好気法は、既存の処理場の施設を少ない変更で窒素除去可能とする処理法であるが、影響する因子が多い。本研究では実験と数値計算により、窒素除去機構の把握と、この処理法の最適な操作条件を検討した。

## 2. 浄化モデルの概要

数値計算に用いたモデルは、IAWPRC、IAWQ の ASM1,2 (Activated Sludge Model No.1,2)<sup>1,2)</sup> をもとに、筆者が下水処理場での窒素挙動把握のために作成したもの<sup>3)</sup> である。本モデルは窒素除去を把握するために必要な生物量 ( $X_5, X_6$ )、有機物量 ( $X_1 \sim X_4$ )、窒素物質 ( $X_8, X_9$ )、溶存酸素 ( $X_7$ ) およびアルカリ度 ( $X_{10}$ ) の 10 の状態変数よりなり、図 1 に示す  $P_1$  から  $P_6$  までの各反応過程を経ると想定した。

これら 6 種の反応過程の化学量論および速度式を、ASM1 で提案されたマトリックス表示すると表 1 のようになる。表 1 中の各係数と定数、諸条件は表 2 に数値例を示した。さらに、これら生物反応に加えて、好気槽での曝気による効果を  $k_L a$  (1/hr) と飽和 DO 値 ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ) で与えた。

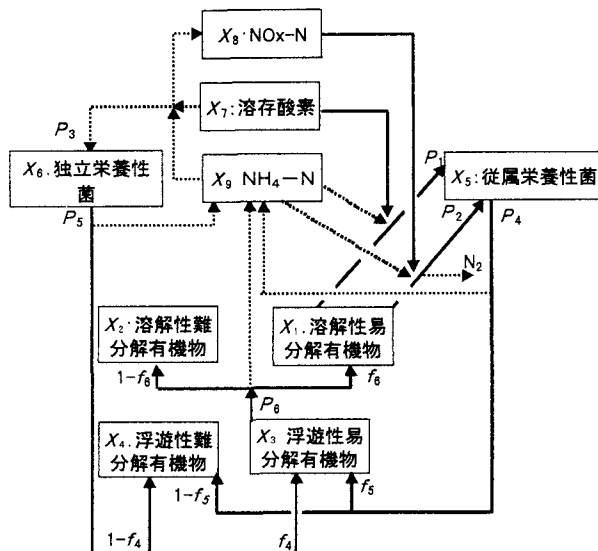


図 1 反応過程と状態変数

表 1 反応速度式と化学量論係数

| $P_i$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $X_j \rightarrow$ | $X_1$            | $X_2$   | $X_3$ | $X_4$   | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$                        | $X_8$                   | $X_9$                         | $X_{10}$ | 反応速度式                                                                                                                                                                            | $p_i$   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|---------|-------|---------|-------|-------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $P_1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 好気条件下の他栄養性菌増殖     | $-\frac{1}{Y_1}$ |         |       |         | 1     |       | $-\frac{-(1-Y_1)}{Y_1}$      |                         | $-n_5 + \frac{Y_1}{n_1}$      |          | $\mu_1 \left( \frac{X_1}{K_1 + X_1} \right) \left( \frac{X_7}{K_7 + X_7} \right) X_5$                                                                                            | $\mu_1$ |
| $P_2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 嫌気条件下の他栄養性菌増殖     | $-\frac{1}{Y_1}$ |         |       |         | 1     |       | $-\frac{-(1-Y_1)}{2.86 Y_1}$ |                         | $-n_5 + \frac{Y_1}{n_1}$      |          | $\mu_1 \left( \frac{X_1}{K_1 + X_1} \right) \left( \frac{K_{17}}{K_{17} + X_7} \right) \left( \frac{X_8}{K_8 + X_8} \right) \eta \cdot X_6$                                      | $\mu_1$ |
| $P_3$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 自栄養性菌増殖           |                  |         |       |         |       | 1     | $-\frac{4.57(1-Y_3)}{Y_3}$   | $\frac{n_6}{Y_3 - n_6}$ | $-\frac{n_6}{Y_3}$            |          | $\mu_6 \left( \frac{X_5}{K_5 + X_5} \right) \left( \frac{X_7}{K_7 + X_7} \right) X_6$                                                                                            | $\mu_6$ |
| $P_4$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 他栄養性菌死滅           |                  |         | $f_4$ | $1-f_4$ |       | -1    |                              |                         | $n_5 - f_4 n_3 - (1-f_4) n_4$ |          | $b_4 \cdot X_5$                                                                                                                                                                  | $b_4$   |
| $P_5$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 自栄養性菌死滅           |                  |         | $f_5$ | $1-f_5$ |       | -1    |                              |                         | $n_6 - f_5 n_3 - (1-f_5) n_4$ |          | $b_5 \cdot X_6$                                                                                                                                                                  | $b_5$   |
| $P_6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 浮遊性易分解有機物加水分解     | $f_6$            | $1-f_6$ | -1    |         |       |       |                              |                         | $n_3 - f_6 n_1 - (1-f_6) n_2$ |          | $k \cdot \frac{X_1/X_5}{K_5 + X_5/X_5} \left[ \left( \frac{X_7}{K_7 + X_7} \right) + \eta \left( \frac{K_7}{K_7 + X_7} \right) \left( \frac{X_8}{K_8 + X_8} \right) \right] X_5$ | $k$     |
| $Y_1$ 他栄養性菌収率 (gCOD/gCOD)<br>$Y_3$ 自栄養性菌の収率 (gN/gN)<br>$n_1$ $X_1$ の N 含有量 (gN/gCOD)<br>$n_2$ $X_2$ の gN/gCOD<br>$n_3$ $X_3$ の gN/gCOD<br>$n_4$ $X_4$ の gN/gCOD<br>$n_5$ $X_5$ の (mgN/mgCOD)<br>$n_6$ $X_6$ の (mgN/mgCOD)<br>$f_4$ 他栄養性菌死滅後、 $X_3$ になる割合 (-)<br>$f_5$ 自栄養性菌死滅後、 $X_3$ になる割合 (-)<br>$f_6$ 加水分解後、易分解物になる割合 (-)<br>$\eta = (C_2 - C_0) \cdot 50 / 14 (C_2, C_0: X_5, X_6 \text{ の係数})$ |                   |                  |         |       |         |       |       |                              |                         |                               |          |                                                                                                                                                                                  |         |
| $X_1$ 溶解性易分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_2$ 溶解性難分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_3$ 浮遊性易分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_4$ 浮遊性難分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_5$ 溶解性易分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_6$ 溶解性難分解有機物 (mgCOD/L)<br>$X_7$ 溶存酸素 (mgCOD/L)<br>$X_8$ 硝酸性窒素 (mgCOD/L)<br>$X_9$ 溶存酸素 (mgCOD/L)<br>$X_{10}$ アルカリ度 (mgCaCO <sub>3</sub> /L)                                                                                                      |                   |                  |         |       |         |       |       |                              |                         |                               |          |                                                                                                                                                                                  |         |

\*京都大学大学院工学研究科 (Graduation School of Engineering, Kyoto Univ.)、住所: 京都市左京区吉田本町、Tel: 075-753-5166 / Fax: 075-753-5175

\*\*京都府 (Kyoto Prefectural Office)

表2 活性汚泥浄化モデルでの採用反応係数值および実験適用物理条件

| 反応過程 $P_i$           | 速度定数<br>(1/hr) | 化学量論<br>係数  | 半飽和定数(mg/L)<br>DO NO <sub>x</sub> NH <sub>4</sub> X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>1</sub> N含有率 $n_i$<br>(gN/gCOD) | 物理操作                                                    |
|----------------------|----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $P_1$ 好気条件下の他栄養性菌増殖  | $\mu_1$ 0.08   | $Y_1$ 0.75  | 0.2                                                                             | 20                                     | $n_1$ 0.05 上澄みSS(%) 1                                   |
| $P_2$ 嫌気条件下の他栄養性菌増殖  | $\mu_1$ 0.08   | $\eta$ 0.3  | 0.2 2                                                                           | 20                                     | $n_2$ 0.016 $k_a$ (-) 18                                |
| $P_3$ 自栄養性菌増殖        | $\mu_3$ 0.02   | $Y_3$ 0.024 | 0.5 0.5                                                                         |                                        | $n_3$ 0.059 飽和DO濃度 8.84<br>(20°C) (mgO <sub>2</sub> /L) |
| $P_4$ 他栄養性菌死滅        | $b_4$ 0.008    | $f_4$ 0.95  |                                                                                 |                                        | $n_4$ 0.032                                             |
| $P_5$ 自栄養性菌死滅        | $b_5$ 0.003    | $f_5$ 0.95  |                                                                                 |                                        | $n_5$ 0.08 馴致時引き<br>抜き率(%) 3.1                          |
| $P_6$ 浮遊性易分解有機物の加水分解 | $k$ 0.05       | $f_6$ 0.98  | 0.2 2                                                                           | 1                                      | $n_6$ 0.08                                              |

### 3. 実験への適用方法

検証に用いた実験は、ステップ率（後段流入率）および返送率を変化させた逐次回分式実験である。図2の操作サイクルをもちい、表3の操作条件で実施されたが、詳細条件は別報<sup>4)</sup>に示す。

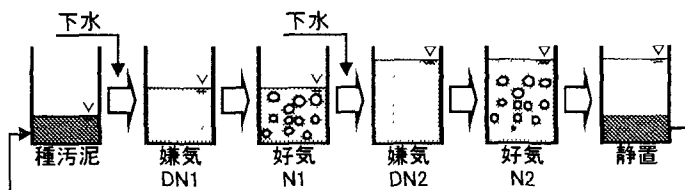


図2 操作サイクル

同実験で用いた汚泥は、嫌気好気活性汚泥法で処理を行なっているK処理場から提供を受け、培養したものである。培養期間は1ヶ月以上で、好気条件下で24時間滞留させ、1.5時間の静置後に槽容量の90%にあたる上澄みを捨

て、残りの10%を返送汚泥とした。実験は約12時間の滞留時間で行なったため、培養に用いた人工下水濃度は通常実験値の2倍のものをを用いた。

表4は予測計算に用いた流入水の変数濃度であり、人工下水成分濃度を参考に定めた。同じく種汚泥の濃度の例としてRun1の値も示した。なお種汚泥は前培

表3 各Runの操作条件

| Run No.     |         | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    |
|-------------|---------|------|-------|-------|------|------|------|
| 返送率(%)      |         | 50   |       |       | 150  |      |      |
| ステップ率(%)    |         | 20   | 50    | 80    | 20   | 50   | 80   |
| HRT<br>(hr) | DN1     | 1.54 | 2.00  | 2.86  | 0.87 | 1.00 | 1.18 |
|             | N1      | 3.08 | 4.00  | 5.71  | 1.74 | 2.00 | 2.35 |
|             | DN2     | 1.33 | 1.33  | 1.33  | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
|             | N2      | 2.67 | 2.67  | 2.67  | 1.60 | 1.60 | 1.60 |
|             | total   | 8.62 | 10.00 | 12.57 | 5.01 | 5.40 | 5.93 |
| FST         |         | 0.25 | 0.25  | 0.25  | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| MLSS        | mg/L N2 | 2580 | 3075  | 2850  | 2770 | 3075 | 3110 |

表4 設定濃度

| 状態<br>変数 | 人工<br>下水<br>濃度 | 種汚<br>泥濃<br>度* |
|----------|----------------|----------------|
| $X_1$    | 245            | 0              |
| $X_2$    | 2              | 4              |
| $X_3$    | 0              | 1714           |
| $X_4$    | 0              | 1713           |
| $X_5$    | 0              | 7216           |
| $X_6$    | 0              | 192            |
| $X_7$    | 0              | 0              |
| $X_8$    | 0              | 4              |
| $X_9$    | 12             | 0              |
| $X_{10}$ | 125            | 17             |

\* Run1の場合  
単位:mg/L

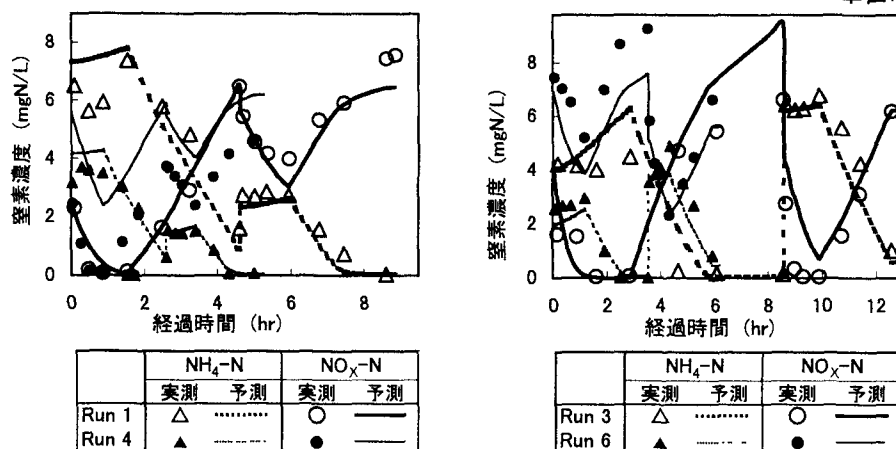


図3 SBR実験結果との比較による浄化モデルの検証

養を同一条件で 30 回以上計算し、定常となった後の値であり、その浮遊性成分 ( $X_3 \sim X_6$ ) 濃度を最終槽(N2)で MLSS が所定濃度となるように定数倍することで、実験での濃縮や希釈操作を表現した。予測値の数値計算は、Excel97 上の VBA をプログラム言語として Runge Kutta 法で実施した。

#### 4. 実験と数値計算の比較

図 3 に、測定値(プロット)と数値計算値(線グラフ)を比較した結果の一部(Run.1,3,4,6)を示す。Run4,6 で酸化態窒素が低い値を示しているが、ほぼモデルで実測の結果が計算の結果で表現されている。これらに加え、アルカリ度、BOD、溶解性 TN、SS をすべての操作条件で検証したが、各ケースともおおむねモデルによって水質挙動が表現できたと考えられた。以上により、本モデルの有効性および係数の妥当性が明らかになったと考えられる。

#### 5. 操作条件の検討

窒素除去に影響を与える条件は、流入水質・ステップ率・返送率・MLSS・DO・SRT 等があげられる。ここでは流入水質とステップ率、ステップ率と返送率の組み合わせが窒素除去に与える影響を検討する。

まず流入水質のアンモニア性窒素濃度 ( $X_0$ ) を同一のまま、基質濃度 ( $X_1, X_2$ ) のみを 1/4 倍、1/2 倍、1 倍、2 倍、3 倍にして、ステップ率を変化させた。これより、C/N 比が高くなるほど除去率が高くなり、最適なステップ率は小さくなる。また、基質が十分に存在すると、ステップ率の変化は影響しないことがわかる。

つぎに、ステップ率と返送率の操作条件の組み合わせを検討する。図 5 は、本実験と同じ流入水質で各ステップ率において返送率を変化させた場合の全窒素の除去率である。どの返送率でも 40~80% で最も除去率が高い。また、返送率が 200% までは除去率は高くなるが、300% で逆転がおこった。これは、DN2 槽に持ち込まれる DO が、脱窒反応を阻害していると考えられる。

#### 6. おわりに

本研究で得られた主要成果は以下の通りである。

- ①本モデルおよび適用係数値で、ステップフィード嫌気好気法の逐次回分式実験が予測可能である。
- ②C/N 比が高いほうが除去率は高くかつ最適ステップ率も低下する。
- ③返送率がある値をこえると、除去率は低下する。

#### 参考文献

1) Henze, M. et al "Activated sludge model No.1", IAWPRC Scientific & Technical Reports No.1(1987).  
2) Henze, M. et al "Activated sludge model No.2", IAWQ Scientific & Technical Report(1995).  
3) 藤井滋穂・川崎重紀: 活性汚泥における窒素、りん、有機物の浄化モデルの提案と検証, 環境システム研究, vol.24, p.695-701, 1996.  
4) 藤井滋穂・常岡信希・瀧本敏之: ステップフィード嫌気好気活性汚泥法の最適ステップ率と槽容量配分に関する実験および理論解析, 環境工学研究論文集, 印刷中(1998)

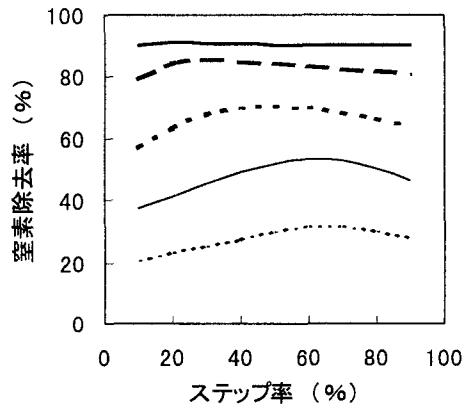


図4 流入水C/N比の影響

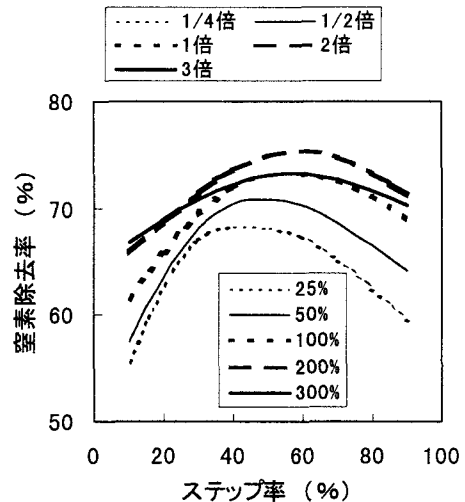


図5 返送率およびステップ率の影響