

# [36] MLSS 制御に必要な汚泥貯留容積の計算法

(株)日立製作所 日立研究所 ○野 北 舜 介  
 京都大学 工学部 平 岡 正 勝

## 1. はじめに

活性汚泥プロセスの制御では、エアレーションタンク溶存酸素濃度と汚泥濃度 (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS と略称する) が主要な制御指標とみなされている。溶存酸素濃度制御には、溶存酸素濃度をフィードバックして風量を調節する方式が広く実用されている。一方、MLSS 制御は設備上の制約などから十分な成功が収められていない。設備上の制約を緩和し MLSS 制御を実現する有力な方法として、活性汚泥をプロセス内に一時的に貯留する方式が提案されている。

汚泥一時貯留方式の設計の際には、汚泥貯留槽容積の定量的な決定方法が明らかでなければならない。本報告では、汚泥濃度に関するプロセス数式モデルについて、与えられた外乱に対する汚泥不足量と過剰量を求めることにより、必要な汚泥一時貯留容積を解析的に計算する方法をのべる。

## 2. 汚泥一時貯留槽を用いる MLSS 制御システムの概要

設備上の制約を緩和し操作自由度を増加させる有力な方法の一つとして、プロセス内に貯留槽を設け活性汚泥を一時的にこれに貯える、いわゆる、汚泥貯留槽並置方式が知られている<sup>1)</sup>。この方式では、図 1 に示すように、返送汚泥を適時に貯留槽に貯えておき、必要に応じて汚泥供給ポンプを介して汚泥をエアレーションタンクに供給することにより MLSS の安定化を達成する。

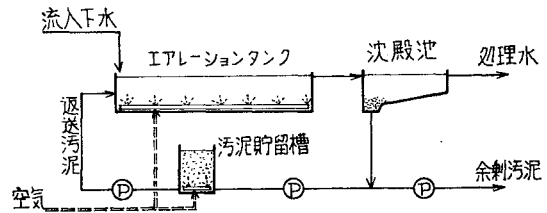


図 1 汚泥貯留槽並置方式

## 3. 汚泥濃度変動の数式表示

3.1 エアレーションタンクの動特性……わが国では旋回流型エアレーションタンクが広く普及しているので、ここでは旋回流型エアレーションタンクに限定して検討を進める。大規模処理施設では、タンク長手方向の水流速が大きいため押し流れに近い混合状態が保たれていると報告されている。押し流れ型の伝達関数は(1)式で表わされる。

$$H_4 = e^{-L_A \cdot p} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $L_A$ : むだ時間、 $p$ : ラプラス演算子である。

3.2 沈殿池の動特性……野北らは、大規模処理施設から採取した時系列データに最小二乗推定法を適用し返送汚泥濃度に対する沈殿池流入汚泥流量及び引抜き汚泥流量の影響を明らかにしている<sup>2)</sup>。すなわち、最終沈殿池は(一次遅れ+積分+むだ時間)要素としてつぎのように近似できる。

$$\Delta S_R = G_1 \cdot \Delta W_q + G_2 \cdot \Delta W_D \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta S_R$ は返送汚泥濃度変動、 $G_1$ と $G_2$ はそれぞれ沈殿池伝達関数、 $\Delta W_q$ は流入汚泥流量(乾量基準)の変動、 $\Delta W_D$ は引抜き汚泥流量(乾量基準)の変動である。なお、 $G_1$ と $G_2$ の一般式はつぎの形式で表わされる。

$$G_1 = \frac{b \cdot e^{-L_D \cdot p}}{p(p+a)}, \quad G_2 = \frac{d \cdot e^{-L_D \cdot p}}{p(p+a)} \dots\dots\dots (3)$$

3.3 汚泥濃度変動を表現する基礎式……流入水量を  $Q$ ，流入水中の浮遊固形物濃度を  $S_0$ ，返送汚泥流量を  $Q_R$ ，及び返送汚泥濃度を  $S_R$  とするとき，エアレーションタンク入口での汚泥濃度  $S_M$  は，汚泥収支から

$$S_M = (S_0 \cdot Q + S_R \cdot Q_R) / (Q + Q_R) \dots\dots\dots(4)$$

いま，それぞれの基準値  $\bar{Q}$ ， $\bar{Q}_R$ ， $\bar{S}_R$  から流入水量が  $\Delta Q$ ，返送汚泥流量が  $\Delta Q_R$ ，返送汚泥濃度が  $\Delta S_R$  だけ変化したとすれば，

$$S_M = \bar{S}_M + \Delta S_M = \frac{S_0(\bar{Q} + \Delta Q) + (\bar{S}_R + \Delta S_R) \cdot (\bar{Q}_R + \Delta Q_R)}{\bar{Q} + \bar{Q}_R + \Delta Q + \Delta Q_R} \dots\dots\dots(5)$$

上式を展開して変動の一次項だけ採ればつぎのようになる。

$$\Delta S_M = K_1(-K_2 \cdot \Delta Q + K_3 \cdot \Delta S_R + K_4 \cdot \Delta Q_R) \dots\dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで，} K_1 &= (S_0 \cdot \bar{Q} + \bar{S}_R \cdot \bar{Q}_R) / (\bar{Q} + \bar{Q}_R), & K_2 &= 1 / (\bar{Q} + \bar{Q}_R) - S_0 / (S_0 \cdot \bar{Q} + \bar{S}_R \cdot \bar{Q}_R) \\ K_3 &= \bar{Q}_R / (S_0 \cdot \bar{Q} + \bar{S}_R \cdot \bar{Q}_R), & K_4 &= \bar{S}_R / (S_0 \cdot \bar{Q} + \bar{S}_R \cdot \bar{Q}_R) - 1 / (\bar{Q} + \bar{Q}_R) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

一方，返送汚泥濃度の変動は，前項のべたように，流入汚泥流量と引抜き汚泥流量の関数として(2)式で与えられる。また，流入汚泥流量と引抜き汚泥流量の変動に影響を与える主要因を採れば，つぎの線型近似式をうる。

$$\Delta W_Q = \bar{S}_M \cdot \Delta Q + \bar{Q} \cdot \Delta S_{M2}, \quad \Delta W_D = \bar{S}_R \cdot \Delta Q_R + \bar{Q}_R \cdot \Delta S_R \dots\dots\dots(8)$$

ここで， $\Delta S_{M2}$  はエアレーションタンク出口（沈殿池入口）の汚泥濃度の変動である。

(8)式を(2)式に代入して  $\Delta W_Q$  及び  $\Delta W_D$  を消去し， $\Delta S_R$  に関して整理すれば次式をうる。

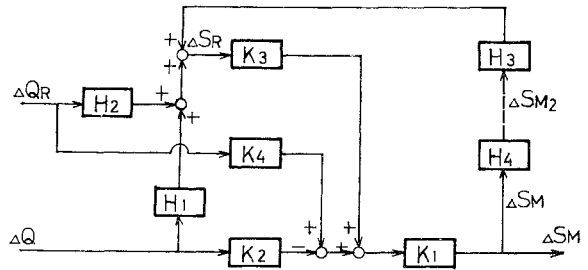
$$\Delta S_R = H_1 \cdot \Delta Q + H_2 \cdot \Delta Q_R + H_3 \cdot \Delta S_{M2} \dots\dots\dots(9)$$

ここで， $H_1$ ， $H_2$  及び  $H_3$  をプラント伝達関数と名づけ次式で定義するものとする。

$$H_1 = G_1 \cdot \bar{S}_M / (1 - G_2 \cdot \bar{Q}_R), \quad H_2 = G_2 \cdot \bar{S}_R / (1 - G_2 \cdot \bar{Q}_R), \quad H_3 = G_1 \cdot \bar{Q} / (1 - G_2 \cdot \bar{Q}_R) \dots\dots\dots(10)$$

以上の二つの基本式，(6)式及び(9)式を用いれば

M L S S の変動  $\Delta S_M$  に対する流入水量変動  $\Delta Q$  及び返送汚泥流量の変動  $\Delta Q_R$  の影響を解明できる。すなわち，(6)式と(9)式をブロック線図にまとめれば図2がえられる。この図において， $H_4$  はエアレーションタンクの伝達関数である。



#### 4. 汚泥不足量の計算

M L S S に影響を与える主要因は流入水量の変動である。また，処理施設の諸元も M L S S の変動に密接な関係を持っている。したがって，汚泥一時貯留槽の設計の際には，外乱（流入水量変化）の傾向及び対象とする処理施設の諸元を特定したのちに作業にかからねばならない。ここでは，流入水量に関して大都市での日間変動パターンを参考として1対2のステップ変化を与える。

計算では，返送汚泥流量を一定に保った状態を仮定する。このとき  $\Delta Q_R = 0$  となり，図2のブロック線図は図3のように単純化される。

表1にプラント諸元とプロセス変数の標準値を示す。

いま，定常状態にある活性汚泥プラントにおいて，時刻  $t = 0$  に流入水量変化が与えられたとする。

(3)式に示した沈殿池の数式モデルには  $L_D$  時間のむだ時間が含まれているから，入力変化後  $L_D$  時間までは返送汚泥濃度の変動は検出されない。したがって，この期間のエアレ...

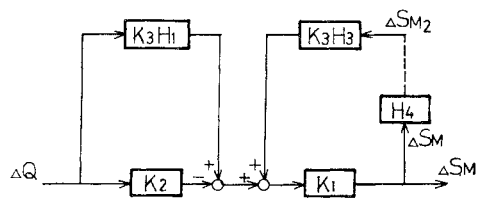


図3 単純化されたブロック線図

表1 プラント諸元とプロセス変数の標準値

項目	記号	単位	数値
ばつ気槽容積	V	m <sup>3</sup>	40000
流入水量	$\bar{Q}$	m <sup>3</sup> /h	9000
返送汚泥流量	$\bar{Q}_R$		1780
M L S S	$\bar{S}_M$	kg/m <sup>3</sup>	15
返送汚泥濃度	$\bar{S}_R$		100
流入水汚泥濃度	S <sub>0</sub>		0.1

シヨンタンク入口のMLSS変動は流入水量増加による稀釈効果だけを考慮すればよい。すなわち、初期には次式を用いる。

$$0 \leq t \leq L_D \text{ のとき, } \Delta S_M = -K_1 \cdot K_2 \cdot \Delta Q \dots\dots\dots(11)$$

エアレーションタンク入口でのMLSS変化はL<sub>A</sub>時間後に出口に伝えられ、さらにL<sub>D</sub>のむだ時間を経て沈殿池出口に伝えられるから、時刻t=0からL<sub>A</sub>+L<sub>D</sub>までの期間、沈殿池出口での汚泥濃度に変化はない。すなわち、 $\Delta S_{M2}=0, \Delta S_R=0$ 。これを図3のブロック線図上で考えれば、右側のフィードバック回路からの信号bはゼロである。したがって、エアレーションタンク入口の

MLSS変動は次式で表わされる。

$$L_D \leq t \leq L_A + L_D \text{ のとき, } \Delta S_M = K_1(-K_2 + K_3 \cdot H_1) \cdot \Delta Q \dots\dots\dots(12)$$

流入水量のステップ変化として、t < 0 のとき Q=6000m<sup>3</sup>/h、t ≥ 0 のとき Q=12000m<sup>3</sup>/h を与えるとすれば、伝達遅れ時間はL<sub>A</sub>=2.9hである。つきに、表1のプロセス状態変数及び(3)式の沈殿池伝達関数を(10)式に代入し、プラント伝達関数を求める。すでに、沈殿池のむだ時間については(11)式で考慮したので、(12)式では、むだ時間項e<sup>-td</sup>を除いた沈殿池伝達関数G<sub>1</sub>'とG<sub>2</sub>'から求めたプラント伝達関数を用いてよい。すなわち、(13)式を(10)式に代入して(14)式を求め、これを(12)式に代入して(15)式を導いた。

$$G_1' = b / \{ p(p+a) \}, \quad G_2' = d / \{ p(p+a) \} \dots\dots\dots(13)$$

$$H_1' = b \cdot \bar{S}_M / \{ p(p+a) - d \cdot \bar{Q}_R \} \dots\dots\dots(14)$$

$$\Delta S_M' = K_1 \left\{ -K_2 + \frac{K_3 \cdot b \cdot \bar{S}_M}{p(p+a) - d \cdot \bar{Q}_R} \right\} \cdot \Delta Q \dots\dots\dots(15)$$

(計算例1)

沈殿池伝達関数の係数として、a=0.714、b=0.2×10<sup>-3</sup>h/m<sup>3</sup>、d=-0.15×10<sup>-3</sup>h/m<sup>3</sup>、L<sub>D</sub>=0.15hが報告されている<sup>3)</sup>。これらの値と表1のプロセス変数を用いて(11)式と(15)式を計算し、これらを逆変換して次のMLSS経時変化式をえた。結果を図4に示す。

$$0 \leq t \leq 0.15 \text{ のとき, } \Delta S_M(t) = -0.99 \dots\dots\dots(16)$$

$$t \geq 0.15 \text{ のとき, } \Delta S_M(t) = 120 - 13.5 e^{-0.026(t-0.15)} + 0.508 e^{-0.638(t-0.15)} \dots\dots\dots(17)$$

MLSSの初期減少を補償する量の汚泥が貯槽に存在し自由使用が可能であれば、エアレーションタンク入口のMLSSを一定に保つことができる。このときには出口のMLSSも一定となるから(汚泥増殖量が無視すれば)、 $\Delta S_{M2}=0$ がつねに成り立つ。したがって、汚泥不足量の算出に当って図3のブロック線図上の右側フィードバック回路を考慮する必要はなく、MLSSの初期変動を表現する

(11)式と(12)式によって汚泥不足量を求めてよい。

図4に斜線を施した濃度減少値と流量の積を積分して汚泥不足量W<sub>i</sub>を求めた。W<sub>i</sub>=-28800kg。

5. 汚泥過剰量の計算

返送汚泥流量を一定にして運転したとすれば、流入水量の減少時には一時的に返送汚泥が過剰となりMLSSが上昇する。いま、沈殿池からの引抜き流量を一定にして流入水量を変えるとすれば、 $\Delta W_D=0$ とおけるから、(2)式から

$$\Delta S_R = G_1 \cdot \Delta W_Q \dots\dots\dots(18)$$

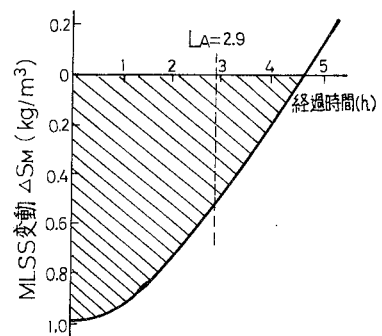


図4 MLSSのステップ応答

(18)式を逆変換してMLSSの経時変化を追跡し、MLSS目標値との偏差に流量を乗ずれば汚泥過剰量を求めることができる。

(計算例2)

流入水量が12,000m<sup>3</sup>/hから6,000m<sup>3</sup>/hに減少したと仮定し、その他の条件を例1と同様として、返送汚泥濃度の経時変化を(18)式により求め図5をえた。また、返送汚泥濃度に返送汚泥流量を乗じて乾量基準の返送汚泥流量を求め図6に示した。

MLSSを1.5kg/hに維持するとすれば、流入水量12,000m<sup>3</sup>/hのときの乾量基準の汚泥流量として $\bar{S}_M \cdot (Q+Q_R) = 20,670 \text{ kg/h}$ 、流入水量6,000m<sup>3</sup>/hのとき11,670kg/hが必要とされる。ゆえに、図6において斜線部の汚泥が過剰であるとみなされる。すなわち、流入水量減少にともなう汚泥過剰量W<sub>2</sub>はW<sub>2</sub>=19,300kgであった。

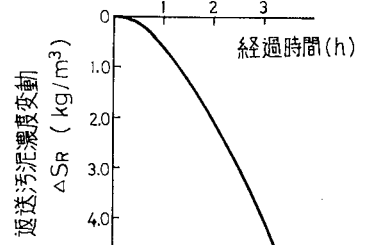


図5 返送汚泥濃度の応答

6. 貯留槽の理論必要容積

流入水量の増減にともなう汚泥不足量W<sub>1</sub>と過剰量W<sub>2</sub>を4節と5節で求めた。両者を返送汚泥濃度の平均値で割り、貯留必要容積として、それぞれV<sub>1</sub>=2,880m<sup>3</sup>とV<sub>2</sub>=1,930m<sup>3</sup>をえた。したがって、両者を補償するためにはV<sub>R</sub>=2,800m<sup>3</sup>が必要であると結論できる。

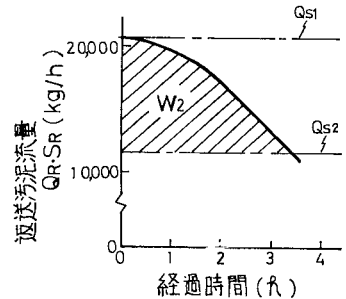


図6 返送汚泥流量の応答

7. まとめ

エアレーションタンクと最終沈殿池の動特性を表現する数式モデルを用いて、流入水量とMLSSを結びつける伝達関数を導き、流入水量のステップ変化に対する汚泥濃度の応答を調べた。つぎに、変化初期の汚泥不足量と過剰量を求め、両者を補償するための汚泥貯留槽の理論必要容積を求めた。

なお、流入水量の最大変化幅や沈殿池の汚泥濃縮・動特性は事例ごとに異なるので、設計に当って事前検討を十分に行なうことが望ましい。また、使いやすいMLSS制御システムを実現するためには、汚泥貯留容積に余裕をとることが重要である。

8. 参考文献

- 1) Roesler J. F. (1975), "Evaluation of the effectiveness of automation", Research needs for automation of wastewater treatment systems, Proceedings of a workshop sponsored by the U. S. E. P. A. in cooperation with Clemson University.
- 2) Nogita S., Ikeguchi T., and Nagasaki R. (1978), "Dynamic model of sedimentation tank", Advances in Instrumentation, ISA 1978 Annual Meeting, 33, part 3, P89-93
- 3) 野北 (1980), "活性汚泥プロセスの数式モデルと自動制御に関する研究", 京都大学学位論文