

# 下水汚泥固液分離システムの分析評価

## —システムダイナミクスによる固液分離システムのモデル化—

竹原明伸\*、平塚 彰\*\*、小川恒一\*\*\*

\* 大阪短期大学経営情報学科  
大阪府南河内郡美原町

\*\* 大阪産業大学工学部土木工学科  
大東市中垣内

\*\*\* 大阪府立大学総合科学部数理・情報学科  
堺市学園町

### 概要

いま、環境ホルモン問題が重要視され、下水道分野からはその解決策の一つとして、し尿分離型下水道の実現に関する基礎的研究が進められているが、その際に重要になるのが、汚泥の固液分離問題である。

本研究では、下水（し尿）汚泥の固液分離システムを分析評価するにあたって、システム・ダイナミクス（SD）的アプローチによる固液分離システムのモデル化を試み、LCA的な観点からの汚泥の最適輸送経路について検討を行った。SD法による固液分離システムのシミュレーションを行った結果、本法が固液分離システムにおける評価法として有用であることがわかった。

### キーワード

汚泥固液分離システム、システムダイナミクス、シミュレーション

## 1 はじめに

近年の社会環境においては、廃棄物処理・リサイクルシステムに関する政策としてLCAがよく用いられている。一方、廃棄物である汚泥を見るとき、下水汚泥処理システムから生じる汚泥を環境資源と捉え、環境制御の視点を重視したLCA的な観点からの汚泥の最適輸送経路についての研究例は少なく、汚泥に関しても、環境インパクトを視野に入れた処理性能の比較評価の方策が求められていると言えよう。

本研究は、活性汚泥法における処理プロセスのうち特に固液分離システムに注目し、上記の観点から環境の変化に対するシステムの挙動に関する分析をシステム・ダイナミクス（SD）的手法により行ったものである。実際的には固液分離装置における処理能力は異なるので、これについては汎用的なものについてモデル化を行い、システムへの入力・出力に対する観点から汚泥の最適輸送経路についての分析評価を試みた。

## 2 活性汚泥法における汚泥の処理プロセス

一般的な下水処理プロセスのフローダイアグラムを図1に示す。最終沈殿池で生じた汚泥の一部は、返送汚泥として曝気槽に返送され、酸化の促進に用いられる。余剰な汚泥は余剰汚泥として最初沈殿池で分離された沈殿汚泥と混合・処理される。この下水から分離された直後の汚泥の含水率は98～99%程度で高い含水率を持っている。この含水率の高い汚泥をそのまま汚泥処分にまわすと輸送経路における施設の容量が大きくなることや、焼却における水分除去のための多量の燃料を必要とする。そこで、容量を小さくするため

に脱水操作が行われる。脱水を行った汚泥は、脱水ケーキ（含水率 45～75%）にすることができる。これを、容積比に換算すると約 1/15 になる。脱水工程においては、被脱水汚泥の含水率が低いほど効率が良く、また、汚泥量も少ない方が有利なので脱水に先立ち濃縮工程が設けられる。実際のプロセスにおいては、下水汚泥は大量の腐敗性有機物質を含むため、これらを分解し、より安定したものにしたうえで脱水が行われる。これらは消化（および洗浄）工程と言われる。このように一般の処理プロセスは、濃縮工程、消化工程、（洗浄工程、）脱水工程の処理工程となる。

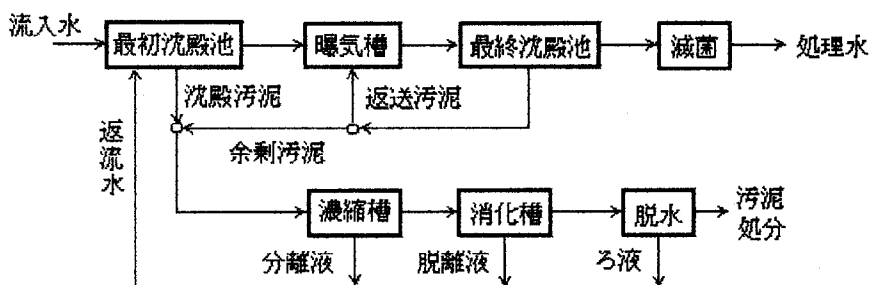


図1 一般的な下水処理プロセスフローダイアグラム <sup>7)</sup>

### 3 各処理プロセスのモデル化

#### 3.1 濃縮工程のモデル化

一般的に、濃縮の方法には重力法と浮上法がある。ここでは、重力法についてモデル化を行った。従来より濃縮法については多くの研究がなされているが、ほとんどの方式が汚泥の沈降実験から求められた資料に基づくものである。汚泥の固形物質量を  $70\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{日}$ 、流入水の濃度を  $\text{SS}2000\text{mg}/\text{l}$  程度、および濃縮時間を 4～5 時間（基準）以内としてモデル化を行った。

濃縮は比較的高濃度の懸濁固形物を含む系において、単粒子自由沈降と凝集性沈降に加え、干渉沈降と圧密沈降が生じる。このような現象は次の関係式に近似できる。界面の初期高さ  $0.6\text{m}$  の場合を図3に示す。

$$H = H_0 \times \exp(-\alpha_4 t) \quad \dots \text{式1}$$

H : 固形物界面の高さ (m)

$H_0$  : 界面の初期高さ (m)

t : 時間 (min)

$\alpha_4$  : 係数 (= 0.02)

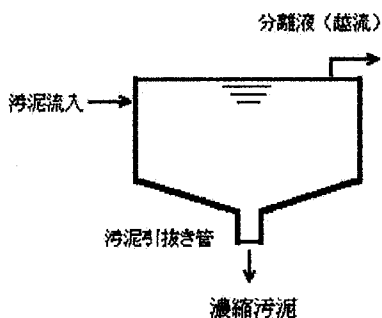


図2 濃縮槽

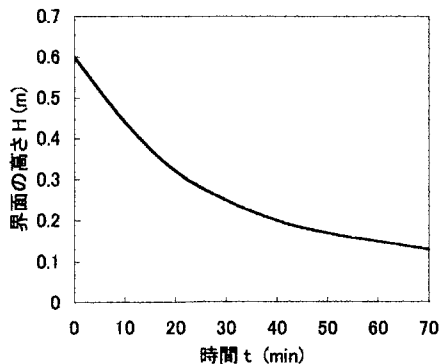


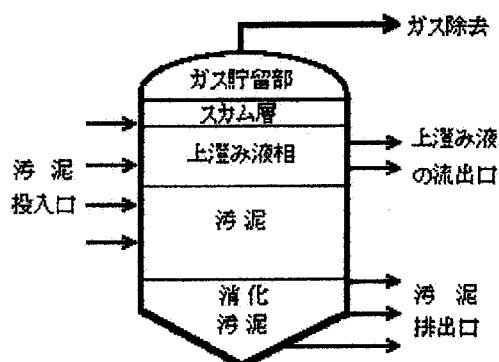
図3 界面沈降曲線

### 3.2 消化工程のモデル化

汚泥中の有機物は嫌気性菌の作用により液化とガス化の二つの基本過程を経る。まず、液化作用においては、炭水化物、蛋白質、脂肪等が加水分解し、さらにバクテリアの酸生成作用によって揮散性有機酸になる。次に、ガス化作用により、液化過程によって生成されたものがさらに分解されて炭酸ガスとメタンになる。これらの消化作用に影響を与える要素としては次のようなものが挙げられる。

- ① 温度： 30～50℃における消化温度－消化日数の関係よりモデル化
- ② 汚泥投入量： 投入生汚泥の量は熟成汚泥量の 1/10～1/20
- ③ pH値： 汚泥投入量を減少
- ④ 攪拌・混和： 消化効率の向上
- ⑤ 投入汚泥濃度： 含水率－消化槽の関係式をモデル化

さらに、十分消化された後消化汚泥は下部に沈殿し、上部に比較的固形物の少ない液体が得られる。これらの脱離液（BOD, SSともに高い値を示す）は、下水処理過程に返送される。消化槽の基本的な構造を図4に示す。



消化は、基本的には細菌による生物学的反応であり、次の式で近似した。

図4 消化槽の構造<sup>7)</sup>

$$p = 1 / (1 + \exp(-\alpha_5 (t - \beta_5))) \quad \dots \text{式2}$$

- p : 消化率
- t : 時間 (日)
- $\alpha_5$  : 係数 (=0.4)
- $\beta_5$  : 係数 (=13)

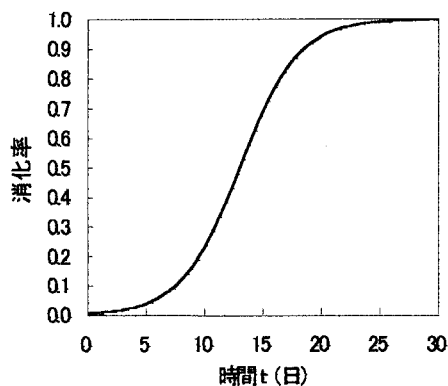


図5 消化率

### 3.3 脱水工程のモデル化

脱水方法には、真空ろ過、加圧ろ過、遠心脱水および過酸化水素脱水が挙げられる。ここでは、真空ろ過を例にモデル化を図る。

標準的な真空ろ過機は、汚泥ポンプ、凝集剤添加装置、汚泥混和槽、ドラム、ケーキ移送装置、真空装置、ろ液排水装置で構成される。処理能力は設計値として  $17.0 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}$  が用いられているが、線形で表現できる。なお、脱水ケーキ固形物量は 18 ~ 25% である。

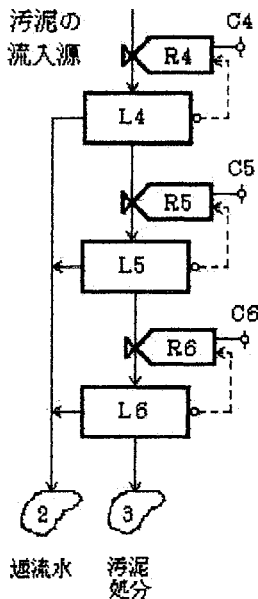
### 4 固液分離システムのモデル化

上述の (1) ~ (3) の工程における現象は、非線型と線形の複合化システムであり、さらに、不連続な結果を示すものもある。このような様々な要素を包含した複合システムの挙動を表現するシステム・ダイナミクス法を用いることが効果的であると考えられる。

まず、ソースとしてこの固液分離システムには図 1 に示す余剰汚泥が投入される。第一段目の濃縮槽において時間の関数として濃縮汚泥が得られる。このときの境界面の高さを  $L_4$  とした。  $R_4$  は濃縮槽への単位時間当たりの流入量として平均値で表す。

つぎに、濃縮槽底部から汚泥引き抜きが行われ、単位時間当たりの流量を  $R_5$  とする。この濃縮汚泥は消化槽への汚泥投入量となる。この際、消化作用に影響を及ぼす含水率は濃縮槽の界面の高さの関数として、また、槽内の温度は係数 (パラメータ) として与える (式 1)。ここで用いた数値は標準的なものを想定している<sup>1)</sup> が、これらは装置の性能仕様により得ることができる。

脱水は消化汚泥の排出量で  $R_6$  の流量とする。ここでは、標準的に用いられた真空ろ過機でモデル化した。いずれの方式においても、線形式で近似することができる。



ここで、固液分離システムのフローダイアグラム (図 6) および記号は次のようになる。

- R . . . . . レイト (流量 :  $\text{m}^3/\text{h}$ )
- L . . . . . 槽内のレベル (量 :  $\text{m}^3$ )
- C . . . . . 初期値
- $\circ \rightarrow$  . . . . . フィードバック

槽内のレベルは、次式で表わされる。

$$L(k) = L(j) + dt \times (R(j) - R(k)) \quad \dots \text{式 3}$$

ただし、 j : 前時刻  
 k : 現時刻、  
 dt : 時間間隔  
 を意味する。

図 6 フローダイアグラム

## 5 下水処理システムのシステム挙動

標準的な下水汚泥についてパラメータを決定し算出した例を示す。

### 濃縮層における算出例

活性汚泥の固形物濃度  $4000\text{mg/l}$  の活性汚泥について、式1の界面沈降曲線を用いる。槽容積を  $9\text{m}^3$ 、流入汚泥流量  $380\text{m}^3$  として次のようになる。ここで係数  $\alpha_4$  は  $0.02$  とした。

表1 引抜固形物濃度

時間 (min)	固形物界面の高さ (m)	引抜固形物濃度 (mg/l)
0	0.60	4000
10	0.49	4886
20	0.40	5967
30	0.33	7288
40	0.27	8902
50	0.22	10873
60	0.18	13280
70	0.14	16220
80	0.12	19812
90	0.10	24199

### 消化槽における消化率の例

消化率は式2で近似されるものとして係数  $\alpha_5$  を  $0.4$ 、 $\beta_5$  を  $13$  で求めると次のようになる。

表2 消化率

時間 (day)	消化率
0	0.005
5	0.039
10	0.231
15	0.690
20	0.943
25	0.991
30	0.999

## 6 おわりに

本研究において、固液分離システムでの各要素の現象について、システム・ダイナミックス (SD) に基づいた分析を行った。本手法を用いることにより、大枠ではあるが、下水処理システムにおける固液分離プロセスの複合的な挙動を表現し、より適切な制御が可能であることがわかった。また、これらの変化に即応したコストの算出についても求めることができた。

今後の課題としては、活性汚泥法の沈殿系についての分析を行い、本研究につないでいくこと、また沈殿系と固液分離系の双方についてシステム・フローチャートを作成してプログラミングを行い、逐次その結果より処理システムの評価ができるようなシステムの構築をして行く計画である。さらに、地域的な処理施設

の配置を調査し、環境の変化に対する処理能力の模試的な評価などが挙げられる。グローバルな環境システムを踏まえ鋭利研究を続ける計画である。

#### 参考文献

- 1) 松永一成：都市の下水処理、学芸出版社、1978
- 2) 小玉陽一：BASICによるシステム・ダイナミックス、共立出版、1982
- 3) 浅居喜代治：システム工学、日本放送出版協会、1986
- 4) 宮本敏光、平塚彰、長坂悦敬：環境資源の最適輸送システムに関する研究－概念的アプローチ、環境システム研究 Vol.25、1997
- 5) 建設省都市局下水道部：日本の下水道、愛甲社、1997
- 6) Akinobu Takehara, Akira Hiratsuka and Koichi Ogawa : Study on Optimum Transport System of Environmental Resources –System Dynamics Approach– SICE '98,1998
- 7) 松尾友矩：水質環境工学－下水の処理・処分・再利用－、技報堂出版、1993
- 8) 竹原明伸、平塚彰、小川恒一：コストパフォーマンスからみた環境資源の最適輸送経路について、環境経済・政策学会 1998年大会報告要旨集
- 9) 竹原明伸、平塚彰、小川恒一：コストパフォーマンスからみた環境資源の最適輸送経路について（2）－SDによる固液分離システムのモデル化を題材にして－、環境経済・政策学会 1999年大会報告要旨集