

[45] 活性汚泥法の制御に関する研究—状態遷移モデルによるアプローチ

京都大学 工学部 平岡正勝 ○津村和志

1. はじめに

本研究の目的は、活性汚泥法制御の新しい方法を提案することにある。従来の方法はまず活性汚泥の動特性をあらわすモデルをつくり、次にこのモデルにもとづいて制御方法を決定する方法がとられてきた。モデルとしては基質・栄養塩類等の除去機構を微分方程式であらわす方法と、ステップ応答などからシステムの動特性をあらわす方法がつかわれてきた。しかしこれらの方法には、実用上越えることのできない限界がある。

すなわち動特性モデルをつかう従来の方法では、そのモデルにもとづく制御方法がモデル中のパラメータを変化させないという保証がない。もしある制御方法が活性汚泥の特性そのものを変化させれば、比増殖速度のようなパラメータ値も変化し、このモデルにもとづく制御方法は、もはや最適でなくなる。

このようなことは活性汚泥が多数の微生物からなる生態系であることが主な原因である。本研究ではこの生態系であるという特徴を逆に利用した。すなわち活性汚泥には、生態系として安定なくつかの状態（極相あるいは準極相状態）があり、活性汚泥はこれらいくつかの状態間を、水温等の環境条件、返送率等の操作条件の変化に応じて移動していると考えられる。活性汚泥の制御とは、環境条件が変化したときに操作条件をどのように設定すれば、よい状態を維持できるか、またよい状態に移動させることができるかを明らかにすることである。

2. 解析の方法

以上の目的を達成するためには、2つのことをおこなわねばならない。第1は安定な状態をみつけだすことである。第2は状態間の遷移を支配する環境因子・操作因子を明らかにすることである。

2.1 安定な状態を検出する方法

観測されたデータを、測定変数の作る空間の中にプロットしていく（図1参照）。もし本研究で仮定されたように安定な状態が存在したとすれば、安定な状態にあるデータは互いに接近して存在し、測定変数の作る空間の中に密度の濃い部分を作り出すであろう。これは安定な状態にあるデータは、その性質が似ているであろうし、操作変数もそれほど動かされることはないからである。

さてこのように密度の濃い部分ができるとすれば、何らかの手法をつかってこの高密度部分を検出できればよい。

本研究では統計的な群別手法であるクラスター分析をもちいて、高密度部分の検出をおこなった。

クラスター分析には多数の手法があるが、階層的手法と非階層的手法に大別される。非階層的手法とは、クラスター構成のあらゆる可能性を考慮し、各クラスター構成をある評価基準のもとに比較し、最も分別状態のよいクラスター構成をこの評価基準にもとづいて選び出そうとするものである。ただこの方法はデータ数が多くなると、計算量が膨大になる。それゆえ本研究では階層的手法をもちいることにする。

階層的手法にも多くの方法がある。ここでは最近隣法、最遠隣法、重心法、メディアン法、ワード法、可変法、WPG法、群平均法を用いて群別の状態を調べた。どの方法をもちいるかによって群別の状態も異なる。どの群別の状態を結果として選ぶかは、最終的には研究者の判断にまかされる。

ここでは以下の解析で良好な群別結果を与えたワード法の説明をおこなう。この方法は次の手順で計算される。

- ①対象とする集団の標本が、それぞれ1個のクラスターであると考え、
- ②対象とする集団のクラスター c_i , c_j の距離 d_{ij} をすべてのクラスターについて計算する。
- ③すべての d_{ij} の中で最小の距離 d_{pq} を求める。
- ④クラ

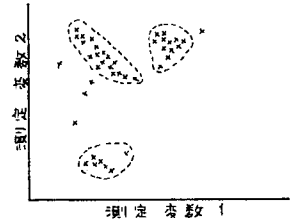


図1 測定変数の作る空間の中でのデータ

スター c_p と c_q を結合して新しいクラスターを形成する。⑤以下②・④→①をくり返す。

この場合、クラスター間の距離の定義は、 c_r を c_p と c_q が結合してできたクラスター、 c_i を c_r に属さないクラスターとし、 d_{iq} 、 d_{pq} 、 d_{ip} をそれぞれクラスター c_i 、 c_q 、 c_p 間の距離とすると、クラスター c_i 、 c_r 間の距離は、

$$d_{ir}^2 = \frac{n_i + n_p}{n_i + n_r} d_{ip}^2 + \frac{n_i + n_q}{n_i + n_r} d_{iq}^2 + \frac{n_i}{n_i + n_r} d_{pq}^2 \dots\dots\dots (1)$$

とする。ここに n_i 、 n_p 、 n_q 、 n_r はそれぞれクラスター c_i 、 c_p 、 c_r が含む標本の数である。

他の方法も同様の手順で計算される¹⁾。

2.2 群別の妥当性のチェック

前節でのべた9つの階層的な手法で標本の群別をおこなったが、群別結果の妥当性を判断するために、マハラノビスの距離による判別分析をおこなった。この結果が、クラスター分析による結果と一致していれば、一応よい群別がなされたと考えられる。

判別分析はクラスター分析による結果にもとづいて各群の平均値を求め、マハラノビスの距離を判別関数として各データがどの群に最も近いかを判定するものである。

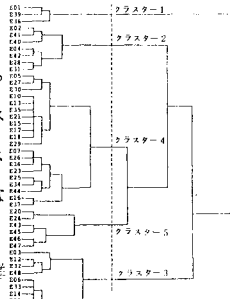


表1 マハラノビスの距離による判別分析

		マハラノビスの距離				
		1	2	3	4	5
クラ ス タ ー 分 析	1	3				
	2		7			
	3			10		
	4				19	1
	5					6

	cluster 1	cluster 2	cluster 3	cluster 4	cluster 5
NOBOD	26.0	8.2	6.8	8.3	10.0
MLSS	1313	1414	1396	1898	2398
SV	5.0	2.1	3.6	2.9	2.2
TSSMP	15.3	19.8	21.5	20.0	12.7
PHIN	138.0	108.4	83.4	95.2	127.8
PHIN	7.2	7.1	7.1	7.1	7.0
TORIN	5.6	7.5	6.8	6.9	5.7
CODIN	71.7	57.0	52.4	58.8	76.5
SSIN	97.0	62.0	65.9	64.3	89.0
INFL	123400	111700	123600	176500	91500
AIR	4.1	4.2	3.7	4.0	3.3
R	0.44	0.43	0.36	0.41	0.47
SVI	660.6	451.5	325.5	219.1	254.5
BSL	0.47	0.31	0.28	0.32	0.18
PRSS	72.7	78.7	71.0	71.8	76.4
RTSL	32750	46640	42290	45420	43720

表2 各クラスターの平均値

図2 ワード法によるデンドログラム

2.3 遷移を支配する環境・操作因子の検出

遷移を支配する因子を検出するために、本研究では分散分析をもちいた。群遷移をおこさせる変数は、群の違いによって数値レベルが異なると考えられる。そこである変数の散ばかりが、群が違ふという要因によってどれだけ説明できるかを調べ、パーセント値であらわした。

このパーセント値の大きい変数は、群遷移をおこした可能性のある変数だと判断される。

以上のべてきた解析の手順をまとめると次のようになる。①いくつかのクラスター分析をおこない、データの群別をおこなう。②判別分析の結果を参考にし、妥当な群別結果を選ぶ。③分散分析によって、群遷移を支配する要因を推定する。

3. ケーススタディ(その1)

安定な状態をみつけるために、クラスター分析をもちいて群別をおこなう場合、どの変数によって群別するかは重要な問題である。本研究では活性汚泥の状態を総合的に表現する因子として終沈流出BOD, MLSS, 濃縮率(返送汚泥濃度÷MLSS)の3変数をもちいた。

データはA下水処理場で昭和51年4月から2年間、月2回の頻度で測定された計46データ(2データは欠損)をもちいた。測定項目は、水温、透視度、pH、ばっ気槽流入SS, BOD, COD, 処理流量、空気量、MLSS, MLVSS, DO, SV₃₀, ばっ気槽流出SS, BOD, COD, 透視度、返送汚泥量と濃度、余剰汚泥引抜き量である。

前述した9つのクラスター分析の手法を適用して群別したところ、ワード法がよい結果をしめした。ワード法による群別と判別分析による分類の結果を表1に対応させてしめす。表は、横方向にクラスター分析による分類、縦方向にマハラノビスの距離による判別分析結果を対応させたものである。対角要素以外がゼロになるとクラスター分析による分類結果が妥当であることを意味する。なお可変法でもワード法と同じ群別結果がえられた。

データの群別状態をあらわすデンドログラムを図2にしめす。各クラスターの平均値を表2にしめす。群遷移

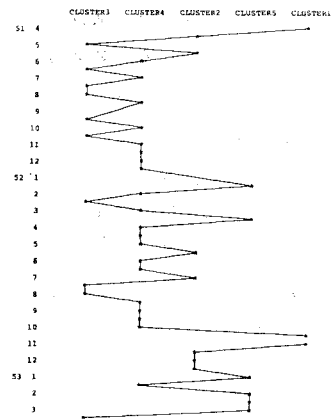


図3 状態遷移の時系列変化(E処理場, WR法)

を時系列的におっかけたものを図3にしめす。

各群の特徴を調べるために、まず処理水のBOD値をみると、クラスター1だけが低い値をしめしている。これは処理水中のSSが35(mg/l)と高いことが原因だと考えられる。SVIも660と高く、バルキング状態をおこして処理が悪化している状態が、クラスター1だと考えられる。

次にMLSSについてみると、クラスター5が最も高い値をしめし、クラスター1, 2, 3はほぼ同程度、クラスター4は中間の値をしめしている。クラスター5でMLSSが高いのは、これらデータが冬期に集中していることから、冬期における人為的な高MLSS運転をあらわす状態か、高MLSS運転をしいられている状態だと考えられる。

最後に濃縮率についてみると、クラスター3だけが高い値をしめしている。汚泥の濃縮率は返送率Rの影響を受け、かりにSSが系外に流出あるいは引抜かれることがないとすれば、終沈での物質収支より、濃縮率 $B = (1 + R) / R$ となる。クラスター3はこの値が3.8に対し実測濃縮率3.6に近い値をしめしている。他のクラスター、たとえばクラスター2では3.3に対し2.1、クラスター4では3.5に対し2.9とかなりのずれがある。またクラスター3ではSVIも126と低く、また処理水のBOD値も最もよいことから判断すると、このクラスターは運転管理上最も安定した状態をあらわしていると考えられる。

クラスター2は、MLSSの値はクラスター3とほぼ同じであるが、濃縮率が違っている。SVIの平均値も高い。クラスター2はクラスター1のバルキング状態とクラスター3との遷移期にある準安定な状態にあると考えられる。

クラスター4はクラスター3と比べ、濃縮率が違うだけでなく、クラスター2と違いMLSS濃度にも差がある。図2のデンドログラムをみると、このクラスターはクラスター5に近いことがわかる。しかし後述するように、クラスター3とクラスター4との間の遷移の頻度が高いことから、クラスター3と4は比較的近い状態にあるといえよう。またクラスター4に含まれるデータ数が最も多いことから、この状態はクラスター3に比べればいくぶん処理状態の悪いものの、クラスター3との関係が深く、A処理場の定常的な運転状態をあらわすクラスターであるといえる。

以上各クラスターの特徴についてのべてきた。次にA処理場がもつこれらクラスター間の遷移構造について説明する。図4は状態間の遷移をまとめたものである。図中にクラスター間の移動回数を付記した。また表3は分散分析の結果をまとめたものである。

これらの図表から判断するとA下水処理場における遷移構造は次のようになっていると推察される。まず理想的な運転状態であるクラスター3から考察を始める。クラスター3からは、クラスター2と4に遷移がおこる。クラスター2, 3間の遷移は、流入水BOD濃度に支配されている。すなわち流入BOD濃度があがるとクラスター2へ、下がるとクラスター3に移行する。一方クラスター3, 4間の遷移は流入SS濃度に支配されている。

クラスター2と4の間には流入条件の差はない。平均値ではクラスター2のほうが流入BOD濃度が高く、クラスター4では流入SS濃度が高くなっているが、これは大きな差ではないようである。両者の違いはMLSSを

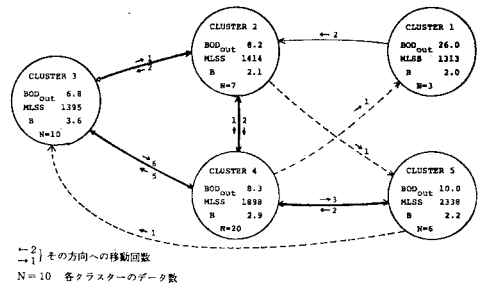


図4. 状態の分類と遷移

表3. クラスター間の因子の寄与率

CLUSTER	1	2	3	4	5
1			PSIN 38.2 * SSin 44.2 * BODin 47.0 *	SSin 30.1 ** INFL 23.9 *** BODin 47.0 *	TEMP 62.2 ** TOSin 25.1 * INFL 57.5 **
2		母集団 操作設計 運転状態因子	BODin 35.6 *		TEMP 64.9 ** TOSin 25.1 * SSin 37.9 * INFL 25.5 *
3	BSSL 31.8 ** SVI 91.6 **			SSin 11.3 *	TEMP 42.8 * SSin 52.8 ** INFL 26.4 *
4	MLSS 55.1 ** BSSL 49.9 ** SVI 59.8 ** SA 30.2 ** PVSS 28.4 **	MLSS 58.0 ** BSSL 22.7 ** SVI 24.9 ** SA 10.5 *	MLSS 48.0 ** SVI 12.0 * SA 10.5 * BSSL 14.8 *		TEMP 24.7 ** SSin 34.3 ** BODin 20.1 * INFL 13.0 *
5	ATIM 70.8 ** MLSS 65.7 ** BSSL 62.9 ** SVI 77.6 ** SA 42.4 ** RTSL 49.3 ** AIR 60.3 **	ATIM 34.6 * MLSS 84.6 ** BSSL 44.9 * AIR 41.9 *	ATIM 20.4 * MLSS 69.5 ** BSSL 24.5 ** R 28.0 *	ATIM 17.4 * MLSS 54.7 ** PVSS 19.6 * AIR 35.0 **	

*...5%有意 **...1%有意 表中の数字は寄与率

いくらに保つか、あるいは保てるかという運転管理上の問題である。

次にクラスター5へは、主にクラスター4から移動がおこる。両クラスターの差をみると流入条件が大きく変っている。流入のSSあるいはBODの影響によってクラスター5への遷移がおこるようである。

クラスター1へも流入水質の悪化によって移動がおこる。流入水質が悪化したときクラスター1に行くか5に行くかは、そのときの水温によって決まる。

以上まとめると次のようになる。A下水処理場の理想的な運転状態はクラスター3である。流入水質が少し悪くなると、SS濃度が高くなったか、BOD濃度が高くなったかによって、それぞれクラスター4とクラスター2に移行する。クラスター2と4の間は、MLSSをどのレベルで運転するかを変えることによって移行させることができる。さらに水質が悪化すると、クラスター1あるいは5へ遷移がおこる。どちらに遷移するかは、そのときの温度条件に依存する。

以上のように推論できるが、この推論が正しいかどうかは、A処理場での実証を必要とする。

4. ケーススタディ(その2)

このケースでは群別をおこなう変数として処理水のTOC, MLSS, 濃縮率の3変数をもちいた。TOCを使ったのはBOD₅の測定がなかったからである。

データはB下水処理場で昭和52年6月から昭和53年3月まで、毎日10時に測定されたデータ206を使った。測定項目は水温、ばっ気槽入口のpH, SS, TOC, MLSS, MLVSS, 空気量, DO, SV₃₀, ばっ気槽流出水の透視度, SS, TOC, 返送汚泥流量及び濃度, 余剰汚泥引抜量であった。

前ケースと同様、クラスター分析の各種手法を適用したところ、モード法と可変法がよい結果をしめした。ここではモード法による群別結果にもとづいて解析をおこなった。

判別分析とクラスター分析の対応表、群間遷移の状態図を、表4, 図5にしめす。分散分析の結果は図5中にしめした。クラスターごとの各変数の平均値を表5にしめす。

これらの図表から遷移構造について次のような推察がなされる。

B下水処理場では、その含むデータ数が一番多いクラスター1が、定常な運転状態をあらわしている。遷移には、クラスター1を中心とする2つのパターンがある。クラスター1と2が作るパターン、この遷移を支配する環境因子は水温である。さらに水温が低下するとクラスター2からクラスター6への遷移がおこっている。クラスター1から2, 2から6へと移るにつれて、MLSS, 汚泥令が高く、長くなっている。もう1つのパターンはクラスター1, 4, 5で構成されるものである。1と4の間の遷移を支配するものは、水温と流入水質の変化である。この状態に余剰汚泥引抜率の変更というような対応がなされるとクラスター5に移行する。クラスター3という悪い状態への移行は流入水質の悪化にともなうものだと考えられる。

B処理場の遷移構造は、水温と流入水TOC及び制御という3つの軸を持っているようである。

参考文献 1. FACOM OSIV CLUSTER 解説書 2. 京大・平岡研, 日本住宅公団関西支社, 「下水処理水の循環利用システムに関する研究」の報告書(その1), 1979.

表4. マハラノビスの距離による判別分析

		マハラノビスの距離による判別分析					
		1	2	3	4	5	6
クラスター判別	1	57	8	1	1		
	2		29				3
	3			9			
	4		1		22		
	5					1	28
	6		1				1

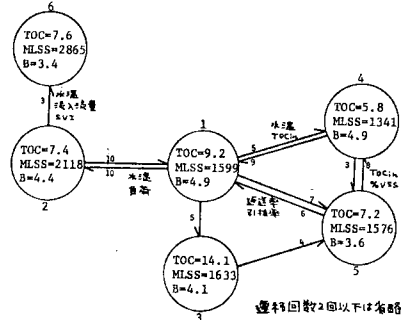


図5. 状態遷移の構造

表5.

クラスター編	1	2	3
因子			
空気比	2.51	3.12	2.55
エアレーション時間	5.85	6.32	6.18
MLSS	1592	2118	1633
汚泥令	10.3	14.5	8.7
返送率	0.28	0.28	0.29
余剰汚泥引抜率	0.0050	0.0051	0.0062
TOC-SS負荷	0.089	0.060	0.099
SVI	74.1	85.9	96.0
DO	3.4	3.3	3.2
PH	6.6	6.6	6.7
水温	21.2	18.9	20.9
MLVSS/MLSS	0.54	0.53	0.53
新流流出TOC	9.2	7.4	14.1
クラスター編	4	5	6
因子			
空気比	2.10	3.04	3.75
エアレーション時間	5.47	7.68	8.74
MLSS	1341	1576	2862
汚泥令	7.6	10.4	21.3
返送率	0.28	0.26	0.42
余剰汚泥引抜率	0.0050	0.0088	0.0078
TOC-SS負荷	0.092	0.080	0.042
SVI	72.1	104.4	234.3
DO	3.7	3.1	3.8
PH	6.6	6.6	6.6
水温	24.3	19.8	12.9
MLVSS/MLSS	0.51	0.55	0.58
新流流出TOC	5.8	7.4	7.6