

下水処理システム機能の判別診断モデル

Diagnostic Discriminant Function Model of Sewage Treatment System's Activity

○ 稲 員 とよの* ・ 小 泉 明 *

Toyono INAKAZU*, Akira KOIZUMI*

(全文審査の上、受理。1996年7月4日)

ABSTRACT; This paper presents a diagnostic model for sewage treatment system using the linear discriminant functions, by which we can judge whether the operation is going satisfactorily or having some troubles in removing waste loads by activated sludge process. First, regarding the planning subjects as hierarchical system, we present the planning process for sewage treatment system management. This process consists of the initial planning, the system activity diagnosis, the forecasting by system simulation, and the feedback from its evaluation. Second, for the system activity diagnosis, the linear discriminant functions are made so as to explain the difference of effluent COD (chemical oxygen demand) concentrations. The variables of these functions are influent COD concentration, MLDO (mixed liquor dissolved oxygen) concentration, and water temperature that are selected from usually measured factors at most of sewage treatment plants. Third, through a case study on an actual plant, the efficiency of calculated discriminant functions is shown, and also an application is made to set the standard levels of outflow against the bulking. Our proposed model and planning process will be great help in computer aided control system for sewage treatment plants.

KEYWORDS; sewage treatment system, operation and management planning, diagnostic model, discriminant function, computer aided control

1. はじめに

近年大都市に於ける下水道普及率は90%を越え、下水道整備の対象は中小都市へと移りつつある。また、社会的には経済優先の政策が見直され、環境と共生するゆとりある生活空間が求められている。これらの変化に伴い、河川及び海域の水質保全や資源の有効利用の面についても下水道が積極的な役割を担うよう期待されており、複数の目標の下で効率的かつ安定的に施設の能力を引き出せるような下水道システムの維持管理計画が必要となっている。

ところで、下水道維持管理計画は、日常的な諸施設の計測・運転といった時間オーダーの課題から、施設変更または拡張計画のような長期的な課題まで多様な内容を含んでいる。下水処理場、管きょ施設、汚泥処理施設といった個々の施設のみならず、下水道全体としての合理的な運用方法を考えて行くためには、空間的・時間的に蓄積された維持管理情報をどのように集約化して、計画主体による意思決定のための情報として提供したら良いかが問題となる。

そこで本論文では、まず、下水道維持管理計画の中の処理場を中心とする課題について、各課題をその対象範囲と時間タームに従って階層化して捉え、自己改良型の維持管理計画プロセスを提示する。そして、下水処理システム機能の診断モデルを提案する。すなわち、下水処理場に於いて日常的に計測されている管理

* 東京都立大学工学部土木工学科 Department of Civil Eng., Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan Univ.

日報のデータを用いて処理水質の判別関数を作成し、活性汚泥法による下水の浄化機能が通常の運転管理により維持可能な状態と、バルキングや汚泥の解体等により処理機能の低下が懸念され、特別な対応策を検討する必要がある状態とを区別しようとするものである。

2. 下水処理場維持管理計画プロセスについて

下水道維持管理計画の内容を明確にするために、実際の処理場に於けるヒアリング調査結果をもとに、各課題間の包含関係を設定して、ISM [Interpretive Structural Modeling]法¹⁾により維持管理課題の構造化を行ったところ、図1の階層構造図を得た。この図に於いて各レベル間の関係は、「下位レベルの情報を入力として上位レベルを維持管理する」という関係になっており、最下層に位置する局所的で短期的な課題から出発して、上位になるほど総合的で長期的な課題を示している。すなわち、レベル1は、下水の量および質に関する測定と機械設備の運転調節を含んでいる。その上位に位置するレベル2には、現在多くの処理場で行われているMLDO制御、MLSS制御といった日常的な維持管理課題が含まれる。レベル2ではレベル1の測定・調節結果を用いてシステムの状態を定量化し、短期的な予測を行って、管理指標を可能な限り一定範囲内に保持することが目的となる。レベル3では、レベル2で定量化した個々のシステム情報をもとに、総体としての下水処理システムがその機能を十分果たしているかどうかを判定し、運転管理方法の代替案を評価することが目的となる²⁾。レベル4では、レベル3までの情報をもとに、長期的視野に立ち、施設の改良や拡張も含めた積極的な維持管理計画の選定が望まれる。

以上のように階層化された維持管理計画を具体的な実行プロセスとして表現すると図2を得る。まず、運転管理計画の設定は、処理施設規模及び処理方法の他、対象地域に於ける環境基準や排出基準の下で行われ、諸施設の具体的な運転方法を検討すると共に、将来の不確実性に伴うリスクを考慮して運転目標を設定する。つぎに、運転管理計画を実行した後、処理システムが正常に機能しているかどうかを判断する。この診断の結果、現状が正常と判断された場合には、処理システムモデルによる予測をもとに運転管理計画の評価

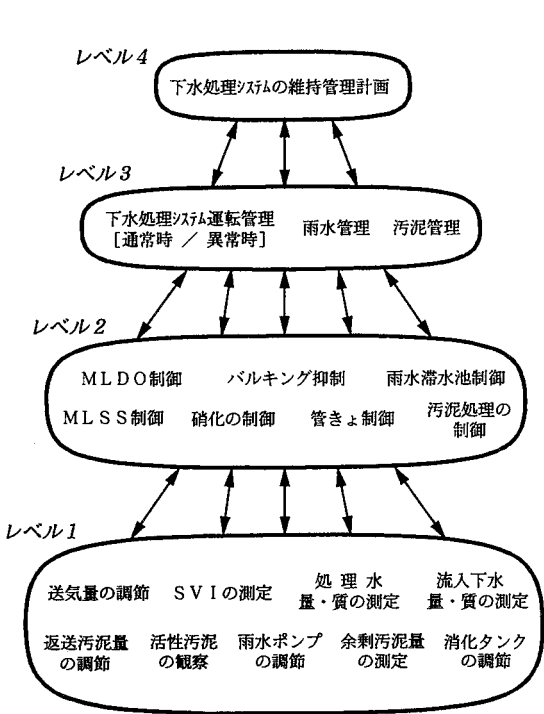


図1 計画課題の階層構造

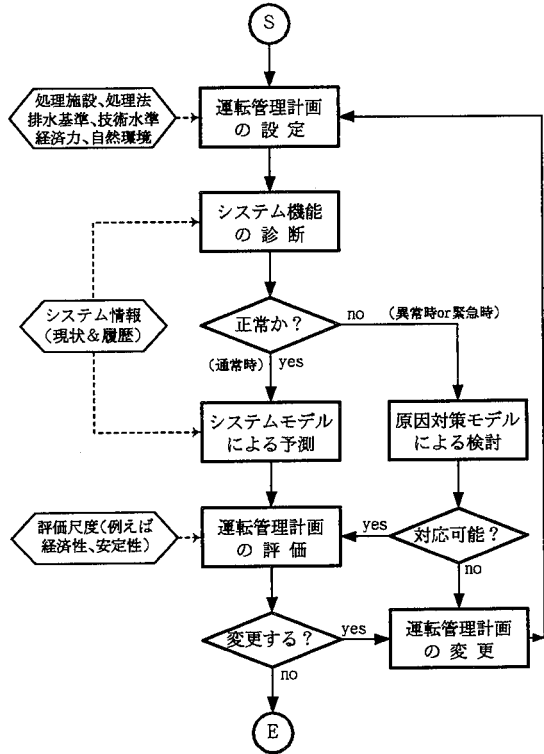


図2 維持管理計画のプロセス

へと進む。一方、異常時あるいは緊急時と診断された場合には、原因対策モデルによる検討を行って速やかに正常状態へ復帰するような対応手段を模索する。最後に、運転管理計画の評価の結果運転方法の変更が必要と考えられる際、または、異常時・緊急時の対応が現状では十分でないと判断される際には、処理方法の変更さらには施設の改良や拡張について検討を行う。この検討結果を運転管理計画にフィードバックすることにより、各処理場の実情に見合った維持管理計画が得られるよう改良を重ねて行く。

このような自己改良型維持管理計画プロセスの中で、運転管理計画の設定は標準的な処理場の場合、とりあえず既存の維持管理指針³⁾を用いて行うことができる。また、処理システムモデルによる予測、原因対策モデルによる検討については既に幾つかの研究がなされている^{4)~7)}。しかしながら、システム機能の診断に関する研究は殆どなされていない。

この診断では、汚水処理、雨水処理、汚泥処理の各部分について、運転目標が現時点で達成されているかどうか、さらに、過去からの履歴を考慮して近い将来も現状を維持または向上できるかどうかという総合的な判断が求められる。現状の処理場に於いて、このような判断は長年の経験を基とし、多くは試行錯誤的に行われてきた。今後、中小都市に於いて、技術者が少なく経験の蓄積も十分でない処理場が増加することが予想され、その際には本論文で提案するような維持管理計画プロセスおよび機能診断モデルをコンピュータに組み込み、運転管理の一助とすることも必要と考える。

そこで、以下では活性汚泥法による水処理系に着目し、判別関数を用いた下水処理システム機能の診断モデルを提案する。

3. 処理水質判別関数の作成

(1) 分析プロセス

判別分析法は多変量解析法の1手法であり、先験的にグループ分けされた m 群がある時に、これら諸群に関する測定データ $x_1, x_2, \dots$ に基づいて、所属不明の任意のサンプルをいずれかの群に判別するものである。このため、判別の対象とするサンプルと各群の重心との距離（マハラノビスの汎距離 $D_k^2, k=1, 2, \dots, m$ ）を計算し⁸⁾、距離が最小となる群に属すると考える。例えば2群の場合、

$$Z = D_2^2 - D_1^2 \quad \dots\dots\dots [1]$$

を求めておけば、 Z が正の場合は第1群、負の場合は第2群に属すると判断される。一般に両群のサンプルはそれぞれの重心のまわりに、あるばらつきをもって集まっているので、両群の重心間の距離（これを判別効率と呼ぶ）が大きいほど2群の判別は容易となる。また、判別距離を比較する際の実用的な式としては、下記の判別関数が用いられる⁹⁾。

$$y_k = \sum_i a_i^{(k)} x_i + a_0^{(k)} \quad \dots\dots\dots [2]$$

$$a_i^{(k)} = v^{-1} \mu^{(k)}, \quad a_0^{(k)} = -\frac{1}{2} \mu^{(k)'} v^{-1} \mu^{(k)}$$

v^{-1} : 分散共分散行列の逆行列

$\mu^{(k)}$: k 群の重心ベクトル

このような判別関数を利用し、処理場で日常的に測定されている時系列データを用いてシステム診断を行うためには、図3に示

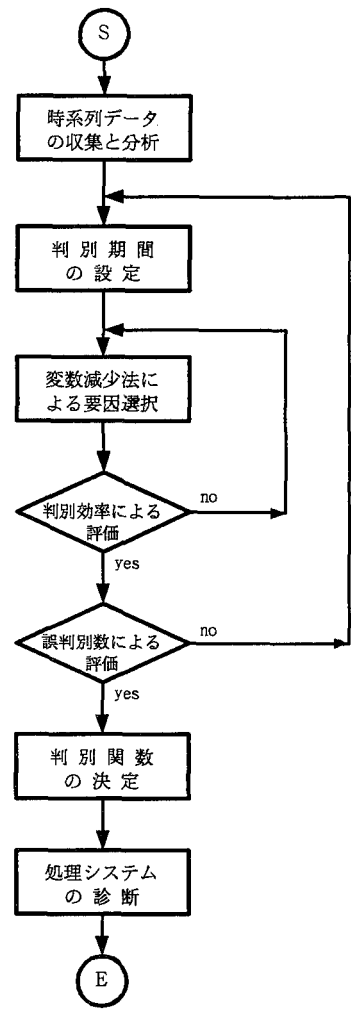


図3 システム診断モデルの作成プロセス

す分析プロセスが必要となる。まず、処理システムの入力および出力、状態量、運転操作に関する測定データを整理し、その基本統計量および時系列としての変動特性を把握する。つぎに、処理結果を表わす要因を用いて判別分析のためのグループ分けを行う。その際、測定時系列に含まれるランダム変動の影響を考慮し、移動平均図を利用して判別期間を決定する。さらに、この判別期間に含まれる測定データを用いて判別分析を行い、判別効率が良く、誤判別数の少ない判別関数が得られるよう変数減少法により要因の選択を行う。最後に、得られた判別関数を用いて処理システムの診断を行い、判別関数の実用性を検討する。

以上が一般的なシステム診断モデル作成プロセスであるが、以下、E処理場に於けるケーススタディを具体的に示す。

(2) 時系列データの収集・分析

対象とするE処理場は計画処理人口約18万人、計画処理面積約1300ha、計画処理水量10万 m^3 /日(晴天時)の規模を有し、都市下水を主とする合流式(一部分流式)下水道の終末処理場である。E処理場放流先の海域は湾となっており、将来的には窒素およびリンを含む総量規制の強化が予測され、施設変更も含めて運転管理方法の改善について多面的な検討がなされている。E処理場への流入下水は同様な2系列の活性汚泥処理プロセスにより処理されているが、今回はこのうちの1系列を分析の対象とした。

E処理場の測定データの中から、週3回以上測定されている要因を中心に表1に示す14要因を選択し、1990年4月から1992年3月迄の2年間(307サンプル)を用いて分析を行う。なお表1の14要因は、以下のよう

- 《出力に関する要因》
- ①処理水COD, ②処理水透視度
- 《入力に関する要因》
- ③初沈流入COD, ④ばっ気槽流入COD, ⑤処理水量
- 《状態量に関する要因》
- ⑥ばっ気槽水温, ⑦ばっ気槽pH, ⑧ばっ気槽SVI
- 《運転操作に関する要因》
- ⑨送気量, ⑩返送汚泥量, ⑪余剰汚泥量, ⑫MLDO, ⑬MLSS, ⑭返送汚泥SS
- また週報上の観測記録より、処理システムの状態を次のようにカテゴリー化して捉え、分析の参考とする。

- 《システム状態の分類》
- 状態0: 処理が良好に行われている場合
- 状態1: バルキング、汚泥の解体、ばっ気槽に於ける硝化が不完全等の理由により処理機能の低下が見られる場合
- 状態2: 処理機能低下に伴い、具体的対策(硫酸バンドの添加等)がとられている場合
- 状態3: 降雨による一次的汚泥流出を避けるため硫酸バンドを添加している場合

以上の要因について基本統計量を計算し、時系列図を作成したところ、どの要因についても1990～1991年度を通じて明らかな傾向変動は表われておらず、定常であると判断された。図4に入力要因の時系列図を、図5に出力要因とシステムの状態が1及び2の測定日を、1991年度についてそれぞれ示す。

表1 分析に用いる要因の基本統計量

(307 サンプル)	平均	標準偏差	最小値	最大値
①処理水 COD [mg/ℓ]	10.3	3.8	4.7	51.0
②処理水透視度 [cm]	80.8	21.5	8.0	100.0
③初沈流入 COD [mg/ℓ]	100.7	31.3	24.0	290.0
④ばっ気槽流入 COD [mg/ℓ]	38.7	7.4	14.0	54.0
⑤処理水量 [千 m^3 /日]	39.1	12.8	22.4	92.2
⑥ばっ気槽水温 [℃]	20.5	3.9	11.6	27.4
⑦ばっ気槽pH	6.5	0.15	6.2	7.2
⑧ばっ気槽 SVI [ml/g]	185.9	106.9	46.0	656.0
⑨送気量 [千 m^3 /日]	149.3	23.2	64.0	191.7
⑩返送汚泥量 [千 m^3 /日]	15.1	4.2	7.5	36.2
⑪余剰汚泥量 [千 m^3 /日]	347.5	129.4	0.0	800.0
⑫MLDO [mg/ℓ]	3.5	1.1	1.0	7.3
⑬MLSS [mg/ℓ]	1570.	261.	880.	2400.
⑭返送汚泥 SS [mg/ℓ]	5195.	1155.	1600.	9800.

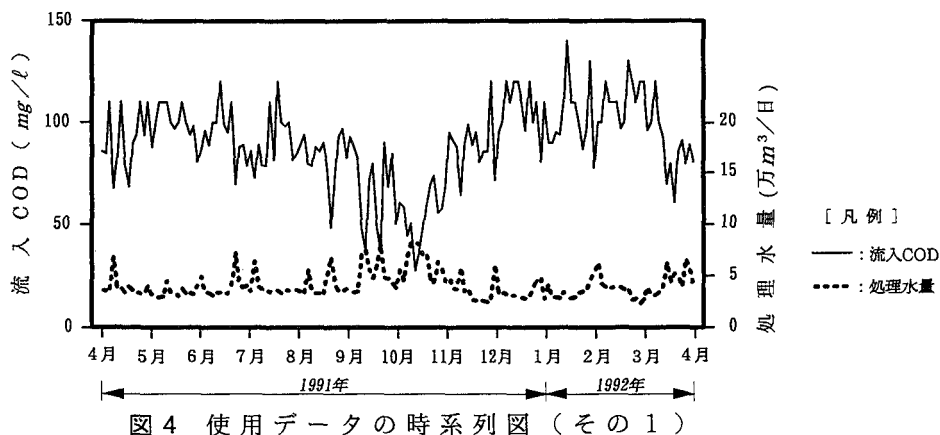


図4 使用データの時系列図 (その1)

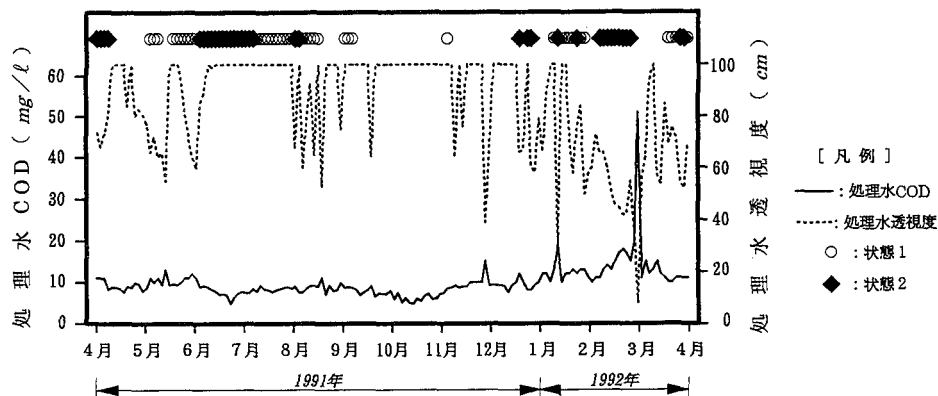


図5 使用データの時系列図 (その2)

(3) 処理水質の判別分析

まず、処理状態の良否を判別する期間(判別期間)を設定するため、処理水 COD の1週間、2週間、1箇月、2箇月、3箇月移動平均図を作成する。これらのうち、測定時系列に含まれるランダム変動に攪乱されず、継続的な変化傾向を読み取れることより、1箇月移動平均を採用した。すなわち図6に示す移動平均図より、最小値を中心に「 $\text{平均値} - 0.5\sigma$ (σ :標準偏差)」以下のサンプルをA群、最大値を中心に「 $\text{平均値} + 0.5\sigma$ 」以上のサンプルをB群と設定する。その結果、図中に示したように、A群は1991年9月4日～11月6日、B群は1992年1月16日～3月18日の各28サンプルとなる。図5と比較すると、B群の期間中には処理機能の低下が観測され、更に処理水質悪化防止対策として硫酸バンドの添加がなされた日もある。一方A群では、ほぼ全期間について処理は良好(状態0)となっている。

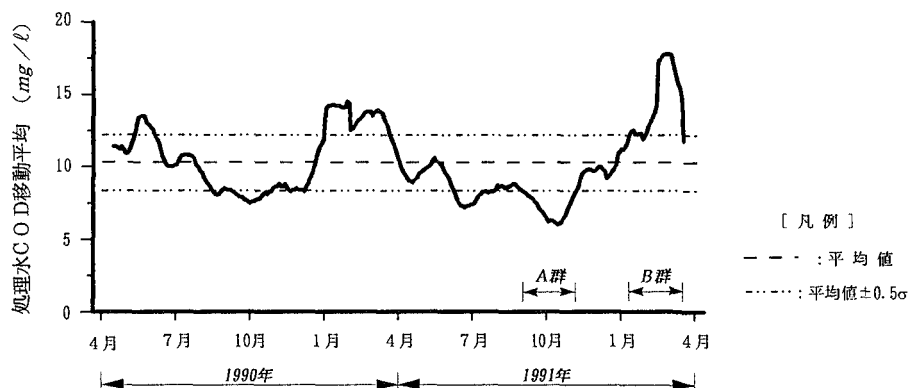


図6 処理水 COD の移動平均と判別期間

判別関数に用いる変数の候補、すなわち、処理結果に影響を与える要因としては、表1に示した要因のうち出力要因(①と②)を除いた12要因(③から⑭)の他、次の合成要因8変数を追加する。これは、従来維持管理指標の1つとして使われているBOD-SS負荷や、下水処理システムのモデル化^{4,5)}に用いた入力制御要因(流入水質-溶存酸素比)のように、処理水質の良否が測定値の比(または積)により記述される可能性についても検討するためである。

《合成要因》	⑮送 気 率	: ⑨／⑤
	⑯COD 負 荷 量	: ③×⑤
	⑰COD 負 荷 量－MLSS 比	: ③×⑤／⑬
	⑱COD 除 去 量－MLSS 比	: (③－①)×⑤／⑬
	⑲流入水質－溶存酸素比	: ③／⑫
	⑳流入水質－DO・MLSS 比	: ③／⑫／⑬
	㉑流入水質 2 乗－溶存酸素比	: ③×③／⑫
	㉒流入水質 2 乗－DO・MLSS 比	: ③×③／⑫／⑬

つぎに、各要因を2年間の平均と標準偏差でそれぞれ基準化した後、これらのデータを用いて判別分析を行う。その際、推定された判別関数に於けるウェイト〔2〕式の係数 a_i の絶対値〕を比較して、小さいものから順次減らして行く変数減少法により要因選択を試みる。A群とB群の重心間のマハラノビスの汎距離、すなわち判別効率と要因数との関係を図7に示す。図7の横軸上に書かれている要因番号は、例えば20要因から18要因へ減少させる場合、20要因による判別関数に於いて④ばつ気槽流入CODと⑪余剰汚泥量のウェイトが小さく、両要因のA・B群判別への寄与は少ないと判断されたことを表わしている。つまり、各要因数による判別関数内にはそれより右側に書かれた要因が残っていることになる。10 要因の判別関数には表1の要因のうち、③初沈流入COD、⑥水温、⑫MLDOが含まれており、以降の合成要因も残っている。

ところで、得られた判別関数を実際の運転管理指標として利用する場合を考えると、なるべくシンプルな指標が望ましく、加えて統計的には、判別効率が大いほど良好な判別関数といえる。また、用いたサンプルに対し、推定された判別関数による判断が異なる結果を示す場合を誤判別と言い、誤判別が少ないほど判別関数の信頼性は高くなる。図7を見ると、要因数が2 から 1 へと減少する際に判別効率が極端に下がっており、同時に誤判別数が急激に増加している。このことより、以下に示す2 要因の判別関数を採用した。

$$y_A = 4.51x_1 - 12.51x_2 - 4.96$$

$$y_B = -7.76x_1 + 1.87x_2 - 4.88$$

$$x_1 = (w_1 - 20.5) / 3.9, \quad x_2 = (w_2 - 3688) / 3873$$

[3]

ここに、 w_1 は水温、 w_2 は流入水質 2 乗－溶存酸素比であり、入力要因と運転操作要因の合成変数に自然環境を考慮した判別関数となっている。[3]式による誤判別数は0 であり、処理水質の良否を判断する上で、サンプルで信頼性の高い判別関数を得ることができた。

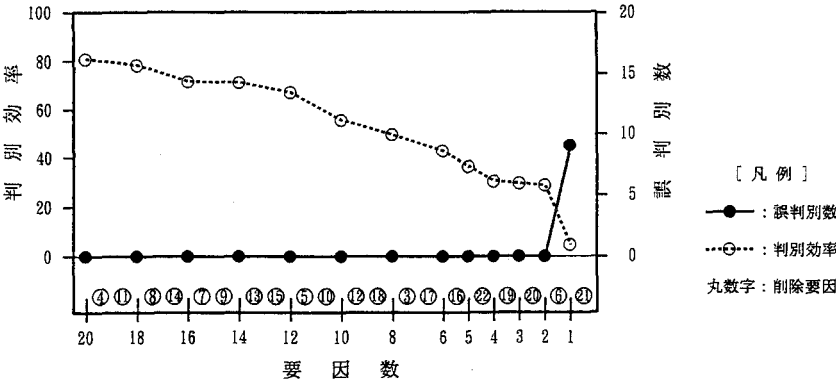


図7 要因数と判別効率の関係

4. 判別関数による処理機能診断

ここでは作成された判別関数による処理機能の診断について述べる。まず判別関数の適用性を検討するため、A・B両群について従来の維持管理指標との比較を行い、判別効果を検証する。つぎに、作成された判別関数を全データ期間（2年間）に適用し、処理水質の良否を判定して、対象としたE処理場を維持管理して行く上で処理機能低下のアラームとなる基準値の提案も行う。

(1) 判別効果の検討

[3]式による判別効果を検討するため、各サンプルのA・B両群の重心からの距離の差（[1]式のZ）を計算する。このZを横軸に処理水CODを縦軸にとり、A・B両群の散布図を作成すると図8を得る。この図を見ると、A群のサンプルはZが負の領域に、B群のサンプルはZが正の領域にそれぞれ楕円状に分布しており、Z=0を分岐点として2つの群が非常に良く分離されているのが分る。

一方、従来E処理場では、活性汚泥プロセスの状態を判断するためSVIおよびBOD-SS負荷が用いられている。そこで、これら2つの管理指標を横軸にとり、同様な散布図を作成して図8と比較した。ただし、BOD-SS負荷については測定項目の関係でCODを用いたもの（③×⑤/⑬/V；Vはばっ気槽体積）で代用している。作成された2つの散布図は、共にA・B両群のサンプルが横に細長く分布しており、ある値を境に分布が切れるという分岐点を特定するのは難しい。このことは横軸の指標（SVIまたはCOD-SS負荷）を単一に用いて処理水質の良否を判定した場合、必ずしも的確な判断を下せるとは限らないことを意味している。つまり、3つの測定項目の線形結合で表わされる判別関数（[3]式）を用いるほうが、処理水質の良否を容易に判定可能といえる。

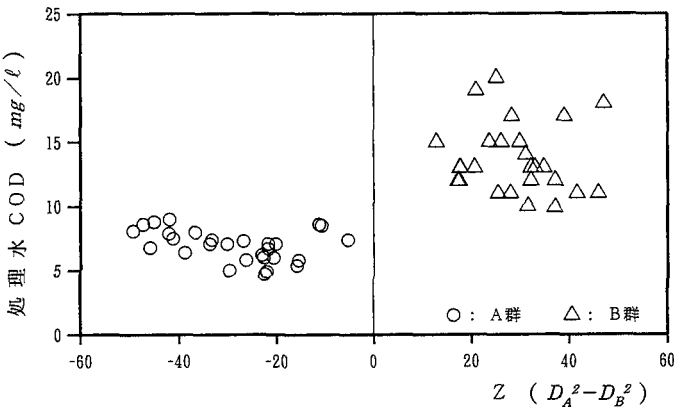


図8 判別関数によるA群とB群の散布図

表2 処理水ランク毎の診断結果

処理水 COD	B群数/A群数	B群率 (%)
6 mg/ℓ 以下	1 / 19	5. 0
7 mg/ℓ	5 / 39	11. 4
8 mg/ℓ	9 / 51	15. 0
9 mg/ℓ	17 / 25	40. 5
10 mg/ℓ	12 / 7	63. 2
11 mg/ℓ	22 / 16	57. 9
12 mg/ℓ	21 / 5	80. 8
13 mg/ℓ	26 / 1	96. 3
14 mg/ℓ	8 / 0	100.
15 mg/ℓ	11 / 1	91. 7
16 mg/ℓ 以上	11 / 0	100.

(2) 判別関数による診断

最後に2年間の全データを用い、処理水質のランク毎に[3]式による診断を行って、各ランクの水質について作成した判別関数がどの様に判断するかを検討する。

この診断結果を表2に、A・B両群の相対的な比率を図9に示す。これを見ると、処理水CODが6 mg/ℓ以下という非常に低い値のときには95% A群と判断されている。反対に16 mg/ℓ以上という高い値のときには、100% B群、すなわち処理機能が低下していると判断されていることが分る。また、

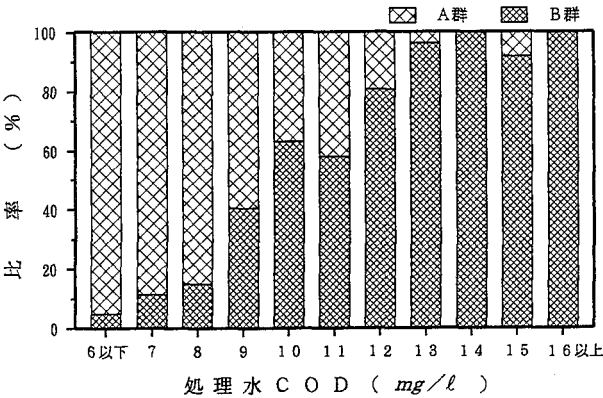


図9 処理水CODに於けるA・B群の比率

処理水 COD が $13\text{mg}/\ell$ を越える場合は 90%以上の確率で B 群と判断されていることから、今回対象とした処理プロセスに対する運転管理の判断基準として、 $13\text{mg}/\ell$ という処理水 COD の値を 1 つの目安とすれば良いという結論を得た。

5. おわりに

本論文では、維持管理計画に於ける種々の課題を階層化して捉えた上で、自己改良型の計画プロセスを提案し、処理場で日常的に測定されているデータを用いて処理システム機能の診断モデルを作成した。以下に主要な結果を列記する。

1) 下水処理場に於けるヒヤリングに基づき、諸課題の包含関係を ISM により構造化した結果、局所的で短期的な課題から総合的で長期的な課題までの 4 階層に分類された。

2) 運転管理計画の設定、システム機能の診断、システムモデルによる予測もしくは原因対策の検討、運転管理計画の評価へと進む維持管理計画プロセスを提案した。このプロセスは、必要に応じて施設の改良や拡張計画も含めて運転管理方法の変更を検討するという積極的な維持管理計画の考え方に立脚するものである。

3) 処理システム機能診断のため、時系列データの収集・分析から始まり、移動平均を用いた判別期間の決定、変数減少法を用いた判別関数の作成を経て、処理システムの診断に至る分析プロセスを提案した。

4) E 処理場を対象とするケーススタディを行い、処理水質の判別関数を作成した。得られた判別関数は、誤判別率 0% という高い信頼性を示し、十分な判別効率を有すると判断された。この関数を用いることにより、処理水質の良否を客観的に判断することが可能となった。

5) 作成された判別関数の応用性を検討するため、全データ期間にこのモデルを適用し、処理水質ランク毎の診断を行った。その結果、処理水 COD の値が $13\text{mg}/\ell$ 以上では B 群が約 9 割以上を占めており、対象とした処理システムについては、この値を処理機能低下の判断基準とすれば良いと考えられた。

なお、この結果は E 処理場固有のものとも考えられ更にケーススタディを重ねる予定であるが、本論文で提案したシステムティックな分析プロセスは種々の処理場に適用可能と考えている。また、窒素やリンについて日常的なデータが得られた際には、本研究と同様な方法により判別関数を作成すれば、より総合的な処理水質の診断が可能となるであろう。

最後に、東京都立大学土木工学科衛生工学研究室の卒業生である富永裕之君には本研究について有益な助言をいただき、同じく関根啓介君には本論文に関する計算等に協力していただいたことに対し、深く感謝の意を表します。

〈参考文献〉

- 1) 吉川和広：土木計画のシステム分析，新体系土木工学 52，技法堂出版，pp.32～56，1980
- 2) 稲員とよの：維持管理計画のための下水処理システムモデルに関する研究，東京都立大学博士学位論文，1994
- 3) 日本下水道協会：下水道維持管理指針；ポンプ場・処理場施設編，1991
- 4) 小泉明・稲員とよの：時間変動を考慮した下水処理システムのモデル化に関する研究，下水道協会誌論文集，27(316)，pp.113～121，1990
- 5) 小泉明・稲員とよの・加藤徹：下水処理システムモデルによる処理水質の予測と評価，下水道協会誌論文集，29(339)，pp.31～41，1992
- 6) Tyteca, D. : Nonlinear Programming Model of Wastewater Treatment Plant, J. of Environmental Eng., ASCE, 107, pp.747～766, 1981
- 7) Gall, R.A.B., and Patry, G.G. : Knowledge-Based System for the Diagnosis of an Activated Sludge Plant ; In Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering, Lewis Publishers Inc., Chelsea, Michigan, 1989
- 8) 川口士郎・小泉明・稲員とよの・諸木正浩：海外水道技術援助に対する日本の水道事業の人的ポテンシャル指標化への試み，水道協会雑誌，57(640)，pp.2～12，1988
- 9) SAS Institute Inc. : SAS User's Guide ; Statistics Version 5 Edition, pp.317～333, 1985