

下水道システムの数式モデルとシミュレーション

Mathematical Models and Simulation for Wastewater Treatment Systems

制御用電子計算機は下水道階層化制御システムにおいて、上位制御ユニットとしてモード変更、並びにパラメータ修正を担当し、フィードフォワード制御、最適制御及び適応制御を行なうものである。しかし、その進歩は従来、活性汚泥処理プロセスの特性把握の困難さに阻まれてきた。

日立製作所は東京都下水道局の指導により、下水道システムにおける流入下水量と処理プロセスの水質に関する数式モデルを基本から検討し、静的及び動的シミュレーションにより特性解析を行ない、同時に東京都下水道局三河島処理場における実測値によってモデルの同定を進めている。これにより実プロセスに適用可能な数式モデルがほぼ確立され、また、より処理成績の良好な新しい制御方式も見いだしつつある。

この論文では、その過程、すなわち各種の数式モデル、シミュレーション技法、適用例及び結果について述べる。

小出正實* Masami Koide
野北舜介** Shunsuke Nogita
田沼正也** Masaya Tanuma
塩谷 真*** Makoto Shioya

1 緒 言

下水処理システムが広域化されるに伴い、システムの設計及び運転の最適化と処理の自動化が要請されている。最近、これに応ずる有力な手段として、下水処理システムを表現する数式モデル及びシミュレータが注目されている。

ここでは、各種の数式モデル及びシミュレーションの方法を紹介するとともに、その利用例を挙げてシミュレーション技術適用の可能性について述べる。

2 数式モデル及びシミュレータの役割

処理対象地域の条件により多少の相違はあるが、流入下水量と下水水質の時間的変動は大きい。合流式下水道では降雨による流入水量と水質の変動がこれに重ね合わされる。もし、流入水量と水質の予測モデルがあれば、中継ポンプ場や終末処理場の運転は大幅に改善されるであろう。

また、終末処理場は活性汚泥プロセスや汚泥処理プロセス

など、多くの要因が複雑に絡み合ったプロセスで成り立っており、更に応答が非線形で特性が経時変化するという特徴をもっている。この種のプロセスの挙動を直感によつて的確に把握することは困難である。従つて、プロセスの改善や新しい制御方式の立案に際しては、運転者の経験に加えて基本現象の数式モデルを組み合わせたプロセスシミュレータを用いて定量的な検討を行なうことが必要とされる。

更に、それぞれのプロセスや要素の特性が数式化された暁には、下水処理システムの運用は効率化され、より合理的な方向を目指すことや、数式モデルをオンラインで制御系に利用することも可能となるであろう。

3 流入下水量の予測モデル

流入水量予測の目的は、(1)降雨時における汚水・雨水ポンプ場群の最適運転制御、(2)非降雨時における流入水配分と処理施設の最適運転制御、及び(3)流入水質の予測である。

上記(3)の目的は、流入水量と水質が連動して変化する傾向に基づいて可能となる。

3.1 変動の原因と実例

流入水量変動の原因及び時間スケールを表1に示す。これらの原因が下水管路網の特性、すなわち幹線の受持ち排水区の広がり方や管路こう配などと結びついて、流達遅れや堆積を生じ変動パターンを決定する。

降雨量及び流入水量変動の一例を図1に示す。すなわち季節は初秋で、熱帯性低気圧や熱雷、台風などが発生している。管渠は合流式で、降雨時の流入水量が非降雨時の数倍にも達していることが分かる。また、非降雨時には日間変動パターンが存在するのが見受けられる。

3.2 流量予測の方法

流入水量予測の一方法を図2に示す。予測は、大(パターン)、中(傾向)、小(残差)の3レベルに分けて行なう。予測の時間スケールは、パターン予測では週間から日間変動を、

表1 流入下水量変動の原因 変動は、上水道の負荷変動と非常に強い相関がある非降雨時と、その数倍の変動をする降雨時とに分類できる。

分類	主排出源	原因	内容	時間スケール
非降雨時	工場・事務所・家庭	年間スケジュール	期, 月	1~6ヶ月
		月間	週	1週
		週間	曜日	1日
		日間	朝昼夕夜	1~数時間
降雨時	家庭的要素による変動	大規模気象の時間変化 中規模気象	季節, 天気, 気温, 湿度, 気圧 "	数日~数ヶ月 数+時間~数日
	その他	社会活動の特異ケース	事故, 事件, 催し	1~数日
降雨時	物理的要素による変動	大規模気象 中 小	台風, 前線 局地前線 雷雲	数日~数週間 数+時間~数日 1~数時間

* 東京都下水道局三河島処理場

** 日立製作所日立研究所

*** 日立製作所システム開発研究所

傾向予測では日間から時間内変動を、残差予測では時間内変動を考慮する程度の長さである。パターン予測は、流入水量の時間変化のパターンを変動原因である工場スケジュールや気象、降雨を考慮して幾つかの categorie に分類し、予測時点までのそれら変動原因の値や気象・降雨予測値とから、どの category になるかを予測する。すなわち統計的な数量化手法やクラス分析手法を用いる。傾向予測は、各 category 内で時間変化の傾向を予測するもので、図 2 に示すように物理モデル、暗箱モデル及び組合せモデルがある。物理モデルのうち、マスキング法改良法は、分布系の運動方程式と連続の方程式とを集中系に近似したもので、他の物理モデルや組合せモデルとともに、河川水量予測手法として使われてきた。また、組合せモデルのうち、Road Research Laboratory (RRL) 法は、単位図法と貯留関数法とを結合したもので、雨水流による流出モデルは、一次・二次モデルの組み合わせ、相関適応修正法は、一次・二次組合せモデルに有効雨量の概念を導入したものである。なお、暗箱モデルのフィルタリング手法には、いわゆる、ユニット・ハイドロ法と単位図法を含めた。最後の残差予測は、各 category 内で実測と傾向予測との差を予測するもので、手法としては暗箱モデルの手法を用いる。

4 プロセスの数式モデル

活性汚泥水処理プロセスにおいては汚染質濃度と汚泥濃度が主要な状態変数である。汚染質濃度として従来から生物化学的酸素要求量 (BOD) が用いられてきたが、計測機器の

進歩に伴い最近では化学的酸素要求量 (COD), 全有機炭素 (TOC), 全酸素要求量 (TOD) などの新指標が提案されている。幸い、これらの指標は互いに相関関係をもっていると報告⁽¹⁾されており、ここでは BOD に限定して論述する。

4.1 曝気槽

槽内の流動状態を表現する流系モデルとして、(1)一次元拡散モデル、(2)押し出し流れモデル、(3)完全混合槽列モデルなどが知られているが、実測値が少ないという理由から、第一近似として押し出し流れモデルがよく用いられる。

反応速度表現に Monod の式を用いた押し出し流れ曝気槽の数式モデルは、次のように表わされる⁽²⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_m CS}{K_s + C} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -U \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\mu_m CS}{K_s + C} - K_d S \dots\dots\dots(2)$$

境界条件 $X = 0$ において $\left\{ \begin{array}{l} C = C_0 Q_0 / (Q_0 + Q_R) \\ S = (S_0 Q_0 + S_R Q_R) / (Q_0 + Q_R) \end{array} \right\} \dots\dots\dots(3)$

ここで、

C : BOD (mg/l), S : 曝気槽汚泥濃度 (mg/l), t : 時間 (h), U : 流速 (m/h), X : 距離 (m), 添字 0 は流入, R は返送を示す。また、 μ_m, K_d, K_s, Y は反応のパラメータである。

4.2 最終沈殿池

最終沈殿池には、良質の処理水を得るための固液分離機能と適度な濃度の汚泥を得るための濃縮機能が必要とされる。

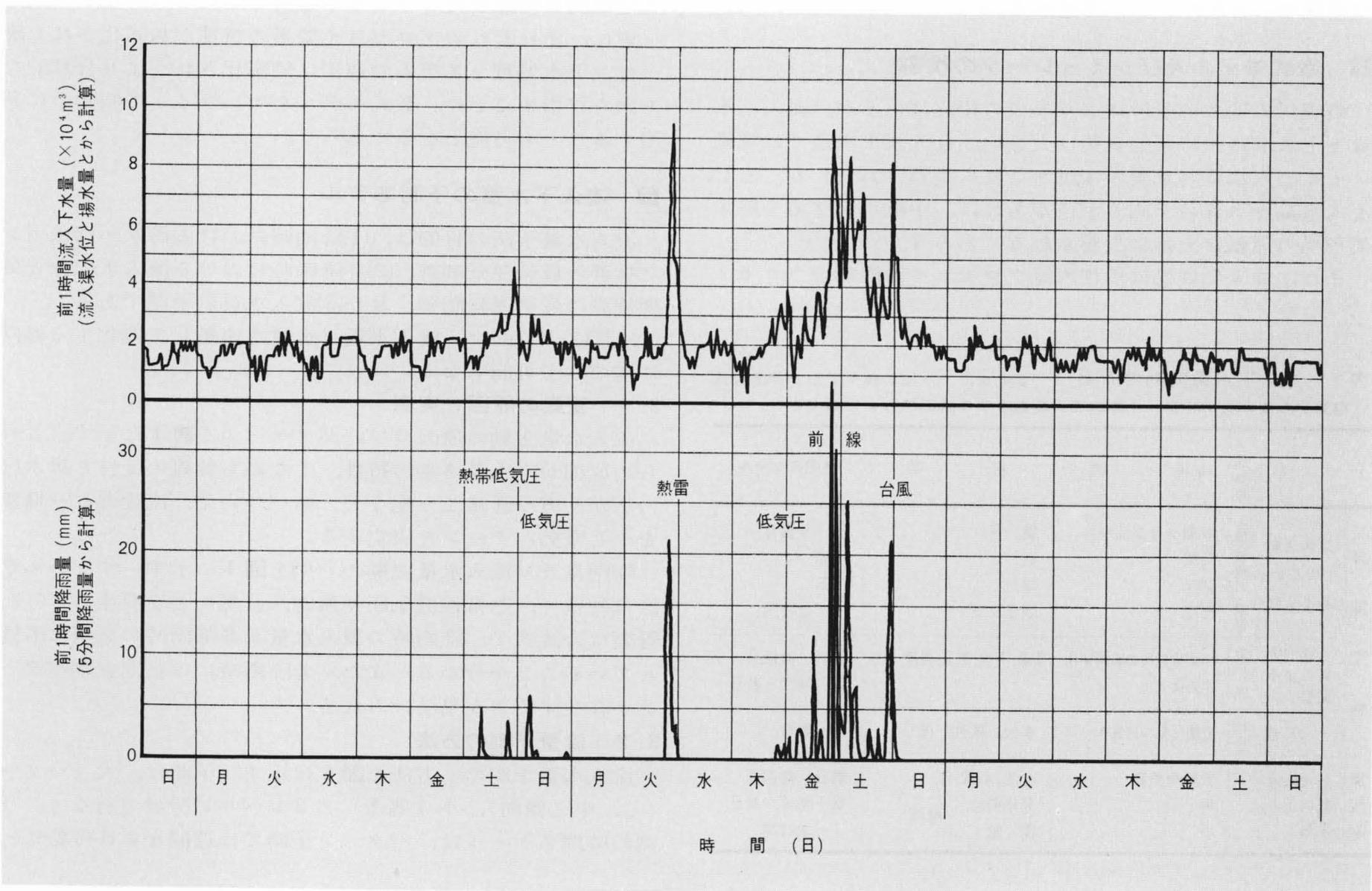


図 1 降雨量及び流入下水量の変動(初秋) 降雨時の流入水量は、非降雨時の数倍に達している。また、非降雨時には、日間変動に若干の規則性が見られる。

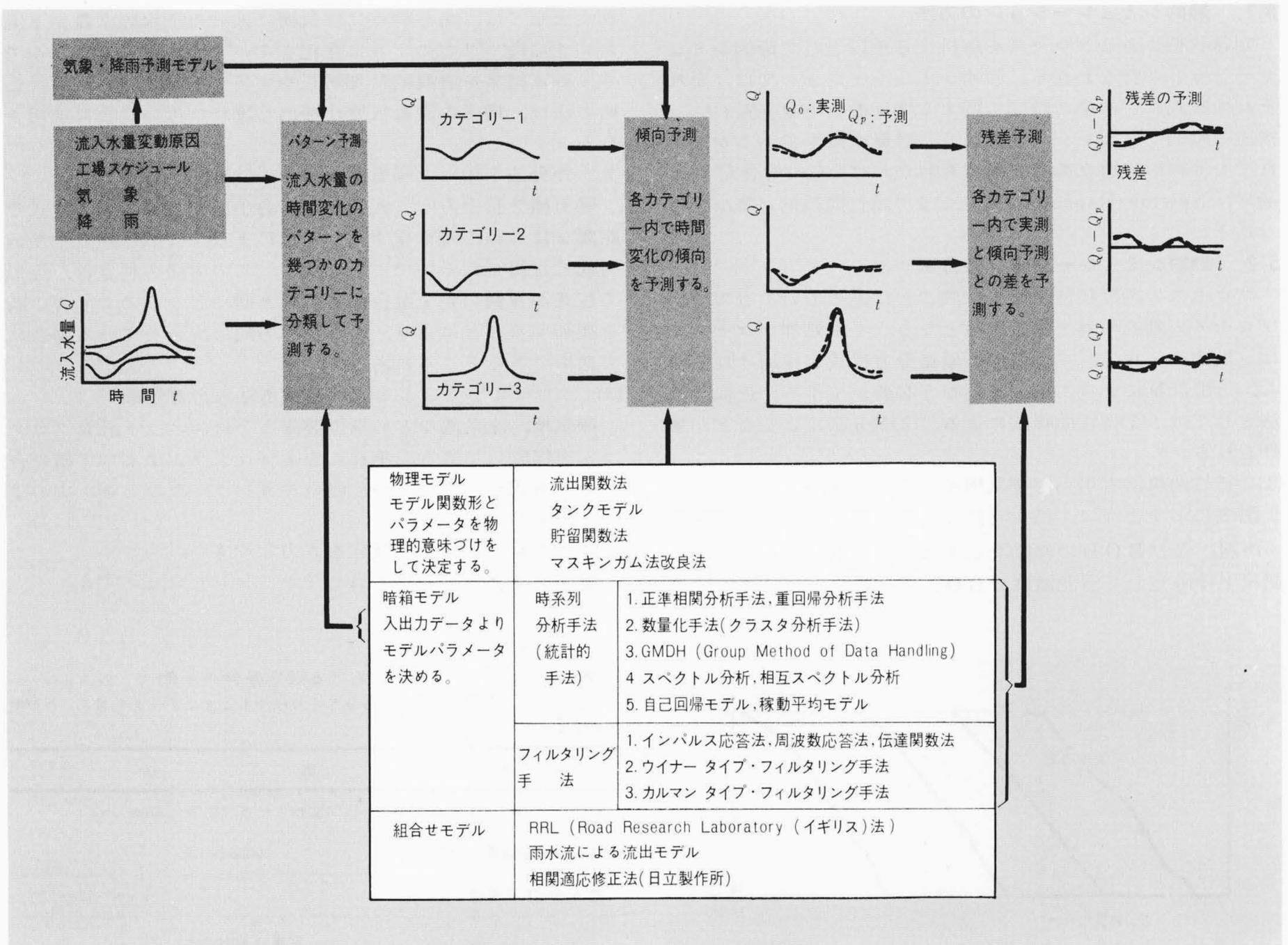


図2 流入下水道水量予測の方法 予測は、パターン予測、傾向予測及び残差予測の、大、中、小の3レベルに分けて行なう。

静特性としては、処理水中の汚泥濃度と水量表面積負荷との関係が実験的に多く求められている。Singhら⁽³⁾によれば、処理水中の汚泥濃度は次のように表現される。

$$Se = S_0 \exp(-kA/Q) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

S : 汚泥濃度(mg/l), A : 沈殿池の表面積(m²), Q : 流入水量(m³/h), k : 実験定数(h/m), 添字0は入口, eは出口を指す。

沈殿池の動特性を求めるには、Bryantら⁽⁴⁾によって整理された数式モデルが使いやすいであろう。Bryantらは、沈殿池を清澄層と濃縮層に二分し、それぞれの層に対して異なったモデルを適用した。清澄層は直列した5個の完全混合槽より成るとし、表面積負荷に比例して清澄層第1槽に流入する汚泥は、5個の完全混合槽を通過後系外に出ると考えた。また、濃縮層では汚泥の静置濃縮フラックスと下降流による輸送フラックスに基づいて汚泥濃度が定まると考え、Shannonら⁽⁵⁾の提案した偏微分方程式を採用した。

4.3 その他のモデル

プロセスの維持管理や電子計算機制御に利用する目的には、主要因子だけを含む単純なモデルが要求される。

Lacroixら⁽⁶⁾は、8個所の終末処理場における水質の実測値を統計的に処理し、汚泥容量指標、曝気槽出口汚泥濃度、返送汚泥濃度、処理水汚泥濃度及び処理水BODに関して、プ

ロセス変数の多項式を与えている。例えば、汚泥容量指標は次式で表現される。

$$SVI = k_1 + k_2(RT) + k_3(RT)^2 + k_4(S)(T) + k_5(T)(BL) \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

SVI : 汚泥容量指標(ml/g), RT : 汚水入替り率(1/d), S : 曝気槽汚泥濃度(mg/l), T : 温度(°C), BL : 基質負荷(1/d), k₁, k₂..., k₅ : 実験定数

また、我が国の終末処理場では汚泥のけん気性処理は一般的でないが、欧米においてはかなり普及している。Andrewsらは汚泥消化槽の動的モデルを作成し、これを用いて消化槽の制御方策を提案している⁽⁷⁾。

4.4 モデルの同定

現実の処理場では、常時観測されていない要因が変動するため、数式モデルの同定にかなりの困難が伴う。Silvestonら⁽⁸⁾は、終末処理場の平均的成績について実測値と静的モデルによる計算値を比較し、4週間以上のデータを平均化したとき、両者はよく一致したと報告している。

5 シミュレーションの手法

ここでは、活性汚泥プロセスを例として、デジタルシミュレーションの手法を紹介する。

5.1 静的シミュレーションの方法

定常状態にあるプロセスを解析する手段として静的シミュレーションが行なわれる。静的シミュレーションでは、それぞれの数式モデル中の時間に関する微係数をゼロと置くから、後述の動的シミュレーションよりも計算が簡単であるが、それでも非線形な連立微分方程式を解かねばならぬ場合が多い。通常はNewton-Raphson法などにより試行錯誤的に解が求められる。

5.2 動的シミュレーションの方法

プロセスの過渡状態を微小時間ごとに追っていくもので、プロセスの動的挙動を知る手段となる。下水処理プロセスでは、数式モデルとして非線形な偏微分方程式が採用されるから、近似計算によって積分を行なう必要が生ずる。近似計算法としては、(1)特性曲線法による、(2)差分法によるなどが挙げられる。

(1) 特性曲線法を用いた曝気槽モデルの計算法

図3に示すように、微小時間ごとに、流れによる曝気槽内の汚泥、及びBODの移動を示す特性曲線を引き、この特性曲線上に限定して汚泥濃度とBODを計算する。この方法の

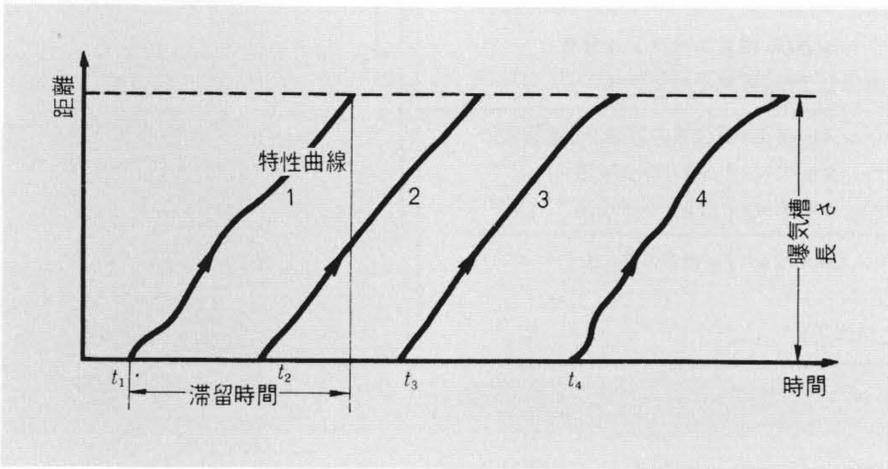


図3 特性曲線の一例 動的シミュレーションの近似計算に際し、結果の直観的理解に役立つ。

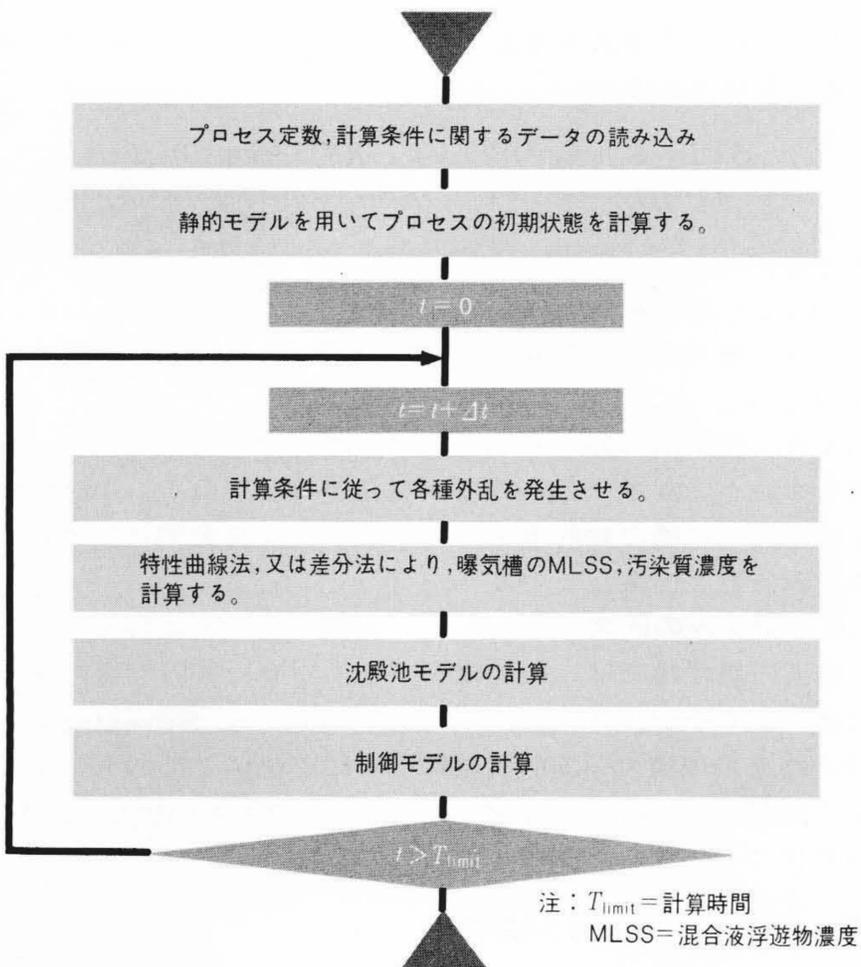


図4 動的シミュレータの計算手順 電子計算機内部では、このようなフローチャートに従って計算が行なわれる。

利点としては、ある時点に曝気槽に入った下水の水質が下流にいくに従ってどのように変化していくか追跡することができ、計算結果を直観的に理解しやすいことが挙げられる。この方法は、槽内の流動状態が押し出し流れに近い場合に適用される。

(2) 差分法を用いた曝気槽モデルの計算法

曝気槽を長手方向にN等分し、各小区間で偏微分方程式を距離xについて差分化する。これによってN個の連立常微分方程式が得られるのでこれを解く。この方法の利点は、近似方程式がN個の完全混合槽モデルと同一となるので、Nの数を調節することにより、水が長手方向に混合している場合にも適用できるところにある。

(3) プロセスシミュレータの構成方法と計算手順

曝気槽、沈殿池などの単位装置ごとにユニット計算プログラムを作成して置き、それらを主プログラムによって結び合わせる方式が汎用性も高く使いやすい⁹⁾。このとき、次のような配慮が望ましい。

- (1) 外乱や操作量の変化を入力しやすい。
- (2) 制御装置の特性も含めてシミュレーションする。

表2 シミュレーションにおける設定条件の一例 シミュレーション計算では、実際の操業条件を正しく反映するようにデータを選ぶことが重要である。

項目	数 値
流入水量	日間変動させる (平均1,300m ³ /h)
流入水浮遊物濃度	200ppm一定
流入BOD濃度	"
返送汚泥量	{ 定量 (320m ³ /h) 定率 (流入水量の1/4)
引抜汚泥量	定量 (30m ³ /h)

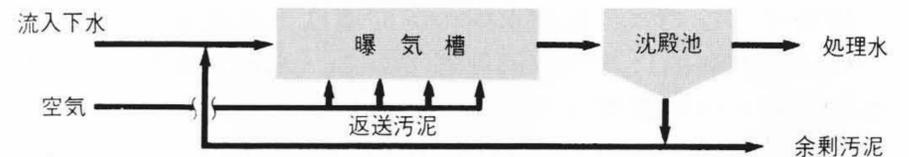


図5 標準活性汚泥プロセス 下水が1箇所から流入する点にこのプロセスの特徴がある。古典的プロセスであるが現在でも広く採用されている。

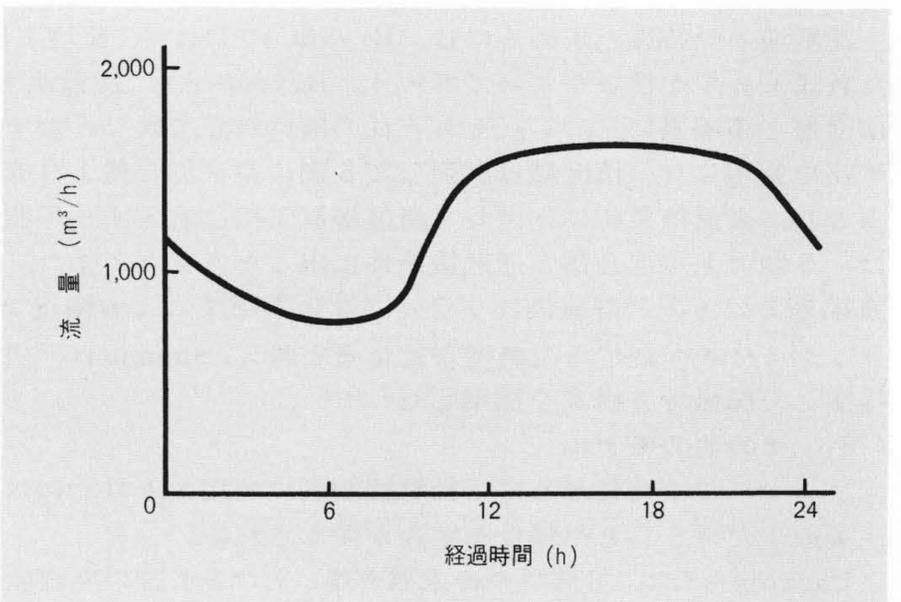


図6 流入水量の日間変動 晴天時の変動であるが、最大流量は最小値の約2倍となっている。プロセスに対しては大きな外乱として作用する。

以上の条件を満たした汎用シミュレータの計算手順を図4に示す。

6 シミュレーションの実例

6.1 プロセス変数の変動

流入下水量の日間変動がプロセス状態変数に与える影響をデジタルシミュレータによって追跡した結果を次に述べる。

図5に示す標準活性汚泥プロセスについて流入下水量は図6のように周期的な変化を繰り返すものとし、曝気槽における汚水入替り時間を平均4時間、沈殿池における入替り時間を平均1.5時間と設定した。その他の計算条件は表2に示す。

汚泥を(1)定量返送する場合と、(2)流入水量に対して定率返送する場合について図7に示すような結果が得られた¹⁰⁾。曝気槽汚泥濃度の一定化を図るには定率返送制御が有効であることがこの図によって分かる。汚泥を定量返送した場合の処理水質と曝気槽溶存酸素濃度の変動を図8に示す¹¹⁾。曝気槽溶存酸素濃度については、計算値と実測値(但し、ステップエアレーションプロセス。処理条件は表2にほぼ等しい)の変動傾向は良い一致を示した。

6.2 流入下水の配分方策

図9に示すステップエアレーションプロセスにおいて、曝気槽の4個の下水注入弁の開度を調節し、良質な処理水を得ようとする制御方策がBusbyらによって検討された¹²⁾。標

準活性汚泥プロセス(弁1を開き、弁2, 3, 4を閉じる)では成績係数が1,130kg BOD/dであるのに対して、流入水量に応じ弁1, 2, 3, 4の開度を変化させる方策を採れば、成績係数は820kg BOD/dに低下することが認められた。ここで成績係数は(処理水BOD)×(処理水量)で定義され、処理水に伴って系外に流出する汚染質量を指す。二つの運転方式における処理水BODの変化傾向は図10に示すようになった。

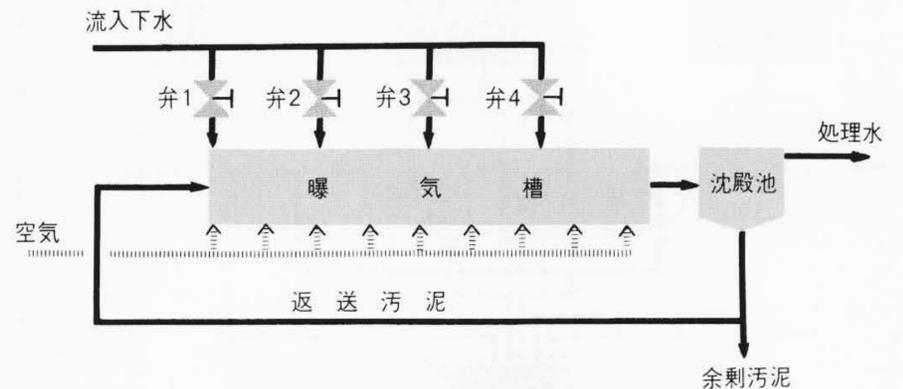


図9 ステップエアレーションプロセス 下水が分割注入される点に特徴があり、高基質荷運転に耐え得ると言われる。我が国で最も普及している。

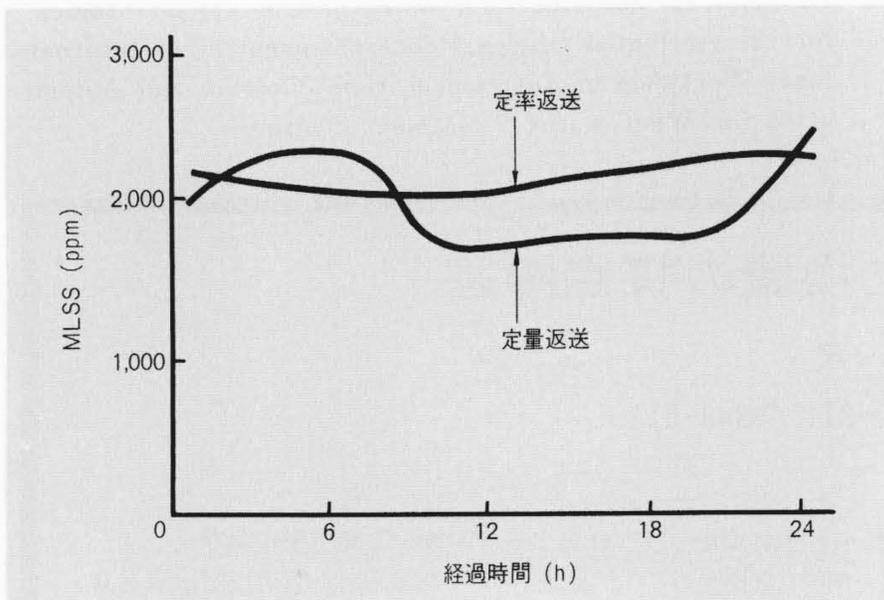


図7 汚泥濃度の経時変化 最終沈殿池から抜き出される汚泥の濃度は、流入下水量に大きく左右される。

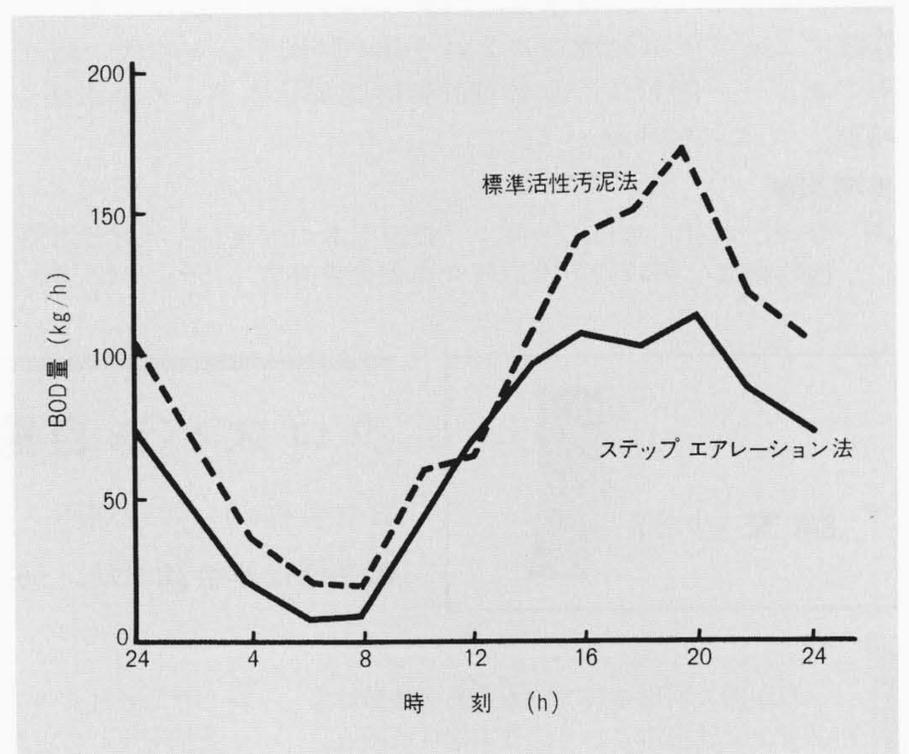
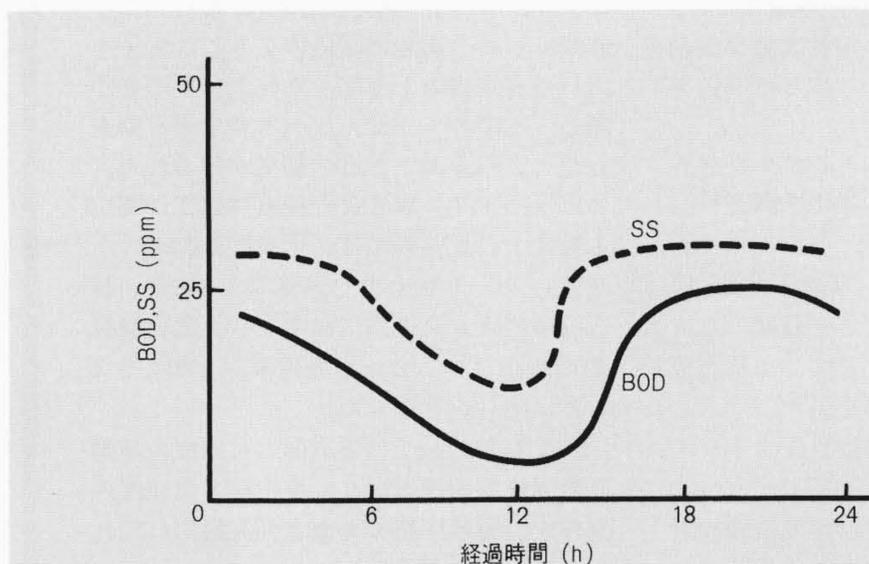
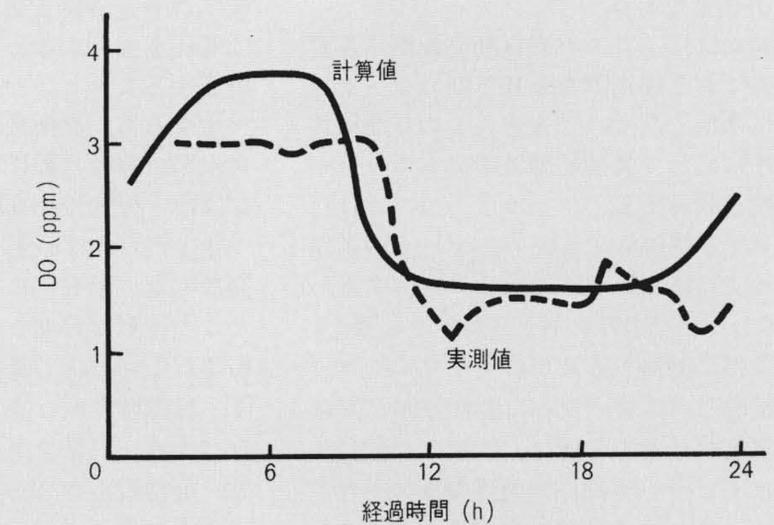


図10 処理水BODの変化傾向 シミュレーション計算によって、下水の注入方法をくふうすれば処理水質が向上することが示される。



(a) 処理水質の経時変化



(b) 溶存酸素濃度の経時変化

図8 処理水質と溶存酸素濃度の経時変化 流入下水量の影響が大きいことが分かる。

7 結 言

下水道諸施設の特性は、計測機器の進歩に助けられて解明されつつあり、これに伴い数式モデルの精度は更に向上する

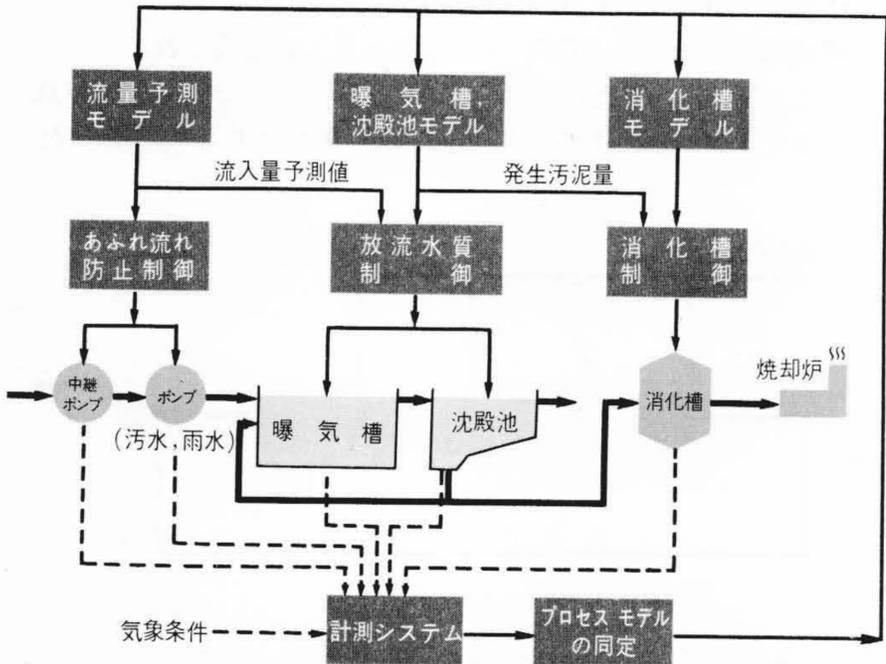


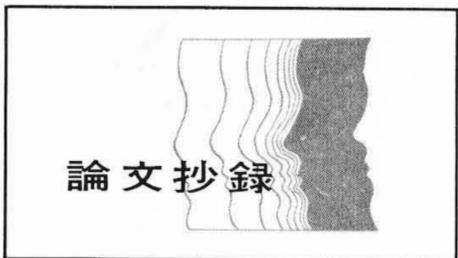
図11 下水処理計算制御システムの概要 将来の制御システムには、数式モデルが組み込まれ最適運転が目標されるであろう。

ものと期待される。将来は、数式モデルを組み込んだ電子計算機によって下水処理システム全体が制御される時代が訪れるであろう。図11に下水処理計算機制御システムの未来像を略記してこの稿を終わる。

参考文献

(1) 合田, 宗宮, 河村, 一井: 「都市下水のエネルギー評価と有機物指標」第11回下水道研究発表会講演集 p. 56 (昭49-5)

(2) 高松, 内藤: (「活性汚泥処理プロセスの最適化に関する研究」) 下水道協会誌 4, No. 43, p. 11 (昭42-12)
 (3) Singh D. P., Bryson A. W. Jr. and Silveston P. L. "As-tochastic model for primary settlers" Proc. 5th Annual Symp. on Water Pollution Research, Waterloo, Ontario (1970)
 (4) Bryant J. O. Jr. and Wilcox L. C. : "Real-Time Simulation of the Conventional Activated Sludge Process" Preprints Paper Joint Autom. Control Conf. 13, p. 701 (1972)
 (5) Shannon, P. T. and E. M. Tory: Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 2, No. 3, p. 203 (1963)
 (6) Lacroix P. G. and Bloodgood D. E. : ("Computer Simulation of Activated Sludge Plant Operation") Journal of WPCF, 44, No. 9, p. 1778 (1972)
 (7) Andrews J. F. : "Development of Control Strategies for Wastewater Treatment Plant" Preprint of International Workshop on Instrumentation, Control and Automation for Wastewater Treatment Systems
 (8) Silveston, P. L., ("Simulation of the Meam Performance of Municipal Waste Treatment Plants") Water Research 6, p. 1101 (1972)
 (9) 大音, 野北, 岩城, 森, 小野寺: (「下水道集中制御システム」) 日立評論 54, 919 (昭47-10)
 (10) 地田, 大越, 野北, 渡辺, 西橋: 「MLSS制御に関する一試案」第11回下水道研究発表会講演集 p. 268 (昭49-5)
 (11) 大越, 野北, 渡辺: 「活性汚泥水処理プロセスの動的シミュレーション」第11回下水道研究発表会講演集 p. 265(昭49-5)
 (12) Busby, J. B. and Andrews, J. F. : "Control Strategies for the Activated Sludge Process" preprint of International Workshop on Instrumentation, Control and Automation for Wastewater Treatment Systems



クロスバ形自動交換機の接点障害

日立製作所 渡辺順平・笠原 司

電子通信学会論文誌 56-A, 311 (昭48-6)

我が国で使用されている自動交換機は大部分公衆通信用として、日本電信電話公社の仕様により製造される。自動交換機は同一形式の製品が長期にわたり、製造、使用される。ゆえに交換機の稼動実績を長年にわたり考察して、製造品質の改善を行なうことが必要である。

本論文は、クロスバ形自動交換機の重要な障害である接点障害を10年間のデータを基礎に考察したものである。この交換機では、呼に応じて共通制御装置であるマークが接続を制御する。マークは一つの呼に対して必ず1回動作するから、マークの動作回数は交換機が処理した呼数に対応する。マークはすべての呼に対して動作を監視し、呼が障害に遭遇するたびにトラブルレコーダを起動し、障害となった動作段階における継電器の状態をトラブルカードに記録する。ゆえにマーク動作回数当たりのトラブルカード数は、交換機の安定度を表わす目

安と考えられるので、これをトラブルカード発生率として定義した。一方、交換機の主論理素子はワイヤスプリング継電器(以下、WSRと略す)である。従って、この継電器の接点障害率とトラブルカード発生率は相関をもつと推定される。本論文では、素子の製造品質と交換機の稼動実績の定量的関係を分析することにより、この関係を確認することとした。

すなわち、交換機ごとにトラブルカード発生率の稼動月数に対する変化を調査し、交換機が稼動後約6ヶ月で、トラブルカード発生率がほぼ一定となり、稼動安定期(偶発故障期に相当)に入ることを確認した。そこで稼動安定期を対象として、品質の分析を行ない、次の量的関係を得た。

- (1) 稼動時におけるWSR接点障害率とトラブルカード発生率の関係
- (2) 製造段階のWSR接点信頼度試験故障率とその素子を用いた交換機の稼動時にお

けるトラブルカード発生率の関係

以上、二つの関係から製造段階のWSR接点信頼度試験故障率と、交換機稼動におけるトラブルカード発生率の定量的関係が得られた。そこでWSRの製造過程の改善により、WSRの接点信頼度試験故障率を低減せしめ、前記の関係によりこの素子を用いた交換機のトラブルカード発生率を予測し、実際のトラブルカード発生率を調査したところ予測どおりの結果が得られた。

以上により、WSRの接点信頼度に関する製造上の改善効果は、交換機稼動時のトラブルカード発生率で評価できること、製造段階のWSR接点信頼度から、交換機稼動時のトラブルカード発生率が予測できることが明らかとなった。

すなわち、素子の製造面と交換機の稼動面の関係が明確となり、交換機の信頼度の改善を、製造、稼動両面より有機的に図れることとなった。