特集 I

下 wastewater 処理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

図-6 Observed pressure fluctuations and velocity versus time during selfpriming of a pipe

ら 0.23 D (D は円管の内径) の位置が最適で、この水位以下ではマニング式を適用し、この水位以上では前もって計算した換算係数を用いて演算するという方法を説明している。

一方、西ドイツの F. Valentin は、開水路から管水

図-7 Model of sponge ball pipe cleaning

路の状態に移行する時の過渡状態も含めた連続的流量計測を、電磁流量計を用いて実験した結果を「下水道システムの満流、非満流状態移行時の連続流量測定」(No.14) に報告している。ここでも、超音波式の流速測定が平均流速にならない点を指摘し、特に過渡状態の場合には誤差が顕著になるという理由で電磁流量計を用いている。開水路状態における電磁流量計の測定誤差は、図-5 に示すような傾向であることを実験で調べている。過渡状態の測定は実験設備で行われているが、その結果の 1 例を図-6 に示す。

Geiger の報告 (No.19) でも述べられているが、採水方式の計測はサンプリング配管内の目詰りが障害となるケースが多く、目詰りしないまでも水質測定に悪影響を与えることが知られている。「サンプリング配管内のスライムの影響とその除去」(No.12, 平塚ら) には、図-7 に示すようなスポンジボール圧送による自動配管洗浄システムが報告されている。

下水処理システムの数学モデル

三 浦 良 輔*

セッション 3 B, 4 B “Mathematical Modeling for Monitoring and Control” では 14 論文があり、このうち 13 論文の発表があった。いずれもさまざまな角度からアプローチしており、種々の数式モデル、その使用目的等について解説があった。発表の全体を整理してみると、数式モデルは大きく分けると、(1) 活性

汚泥の諸生物化学反応をモデル化したもの、(2) データ整理による統計学モデル、(3) 制御工学 (伝達関数表示) モデルであり、またモデルの使用目的は、(1) 活性汚泥プロセスの動的な解明、(2) 制御特性の解析、(3) 制御ループ内のプロセスシミュレータとするものであった。

*東京芝浦電気(株)重電技術研究所水処理グループ主査 Ryosuke MIURA

下废水处理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

特集 I

また今回のワークショップから、活性汚泥処理の自動制御にたいするアプローチに大きく3つの主要な流れが見出せる。すなわち、DO制御による3論文と汚泥量制御による7論文および適応制御に関する統計学手法の応用、活性汚泥の生態学的適応の機構、等の生物の適応を利用または解明の3論文である。他の1編は自動制御におけるサンプリングの理論的考察に関するものであった。

以下に各論文の要約を紹介する。

1 DO 制御

“Aeration Control for Reducing Energy Consumption in Small Activated Sludge Plant” R. C. Clift, J. F. Andrews, U. S. A.

モデル (Clift-Andrews モデル, JWPCF に印刷中) シミュレーションによって、DO計を使用しない送風制御方式各種を解析した。図-1にモデルの構成を示す。

モデル：流入下水中の溶存BODと懸濁性BODは、曝気槽に流入すると汚泥中の貯蔵物 (stored mass) になる。懸濁性貯蔵BODは加水分解を受ける。貯蔵物は生物合成され活性な汚泥 (active mass) に、また活性な汚泥は分解 (organism decay) して不活性な汚泥 (inert mass) になるが、これらの反応で酸素が消費される。また貯蔵されていない溶存性BODの一部は直接活性な汚泥に合成され、この時酸素を消費する。アンモニアの硝化反応についても同様のモデルが構成される。

通常流入BODにたいしてOUR (酸素消費速度) には応答遅れ (lag time) があるが、モデルは貯蔵過程がこれを表現する。

制御シミュレーション結果：酸素供給量 = 酸素要求量

図-1 Structured model (2).

での送風量を100%とし、酸素供給量 = 最大酸素要求量での送風量が160%になる場合に、次の各種の送風制御方式の送風量の過剰分を算出した。その結果、

- ・2台の送風機のオン-オフ制御では128%に下がった。
- ・下水流量に比例した送風では150%にしかない。しかし、この方式に上限値を設定すると126%に低下した。
- ・負荷と酸素要求量の位相ずれを補償したプログラム制御では (カムプログラマー又はマクロプロセッサを用いる) 126%に低下し、さらに上限値を制限すると113%まで減少した。

これらの制御は、一定のサイクル負荷変動の機場に適するものである。また適用には制御システムの経済性と水質への影響等について事前に検討しておく必要がある。

“Dissolved Oxygen Control in the Activated Sludge Process”, G. Olsson, J. F. Andrews, U. S. A.

曝気槽のDOプロファイルを最適なパターンに制御するものである。電算機でディスプレイし運転員に処理状態に関する種々の情報を与えることができる。

図-2に示すDOプロファイルモデル (Olsson & Andrews 1978) は曝気槽出口附近の勾配、出口のDO、最大勾配値、最大勾配点、出口方向への凸状態、の5つのパラメータから成る。これらは水理学負荷、有機物負荷、最大増殖速度、曝気風量、および生物反応の完成度などと関連している。シミュレーション解析によってこれらの変数によるDOプロファイルの動特性について例証して紹介している。シミュレーションに用いた生物反応モデルは上記のAndrewsモデルと同じである。

・炭素性有機物負荷のみの場合とこれにアンモニアな

図-2 Typical DO profile in a plug flow aerator with uniform air flow distribution.

下 wastewater 処理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

特集 I

。制御周期は10分で良好であった。

2 汚泥量制御

“Total Sludge Quantity Control for Activated Sludge Process.” M. Tamura, M. Kashiwagi, N. Tsuchiya, T. Kasai, Japan

汚泥量制御における汚泥日令 (SA) 制御と総汚泥保有量 (T_s) 制御について応答特性をシミュレーション解析しこれらを比較し、後者の T_s 制御方式を提案した論文である。

SA制御は曝気槽内の汚泥総量と返送 (余剰) 汚泥濃度および汚泥令の設定値より余剰汚泥引抜流量を算出しこれを調節するものである。

T_s 制御は総汚泥量の PI フィードバック制御である。総汚泥量は曝気槽および最終沈殿池の数式モデルで算出する。

曝気槽モデル：下水流入量とそのSS濃度および返送汚泥流量とそのSS濃度から曝気槽への流入 MLSS 濃度とし、曝気槽からの流出は押出流れとする。

最終沈殿池モデル：汚泥の沈降および返送汚泥濃度は次式のような1次遅れであると仮定した。

$$dU_S/dt = \{ \beta \cdot S(t) (Q_O(t) + Q_R(t)) - U_S(t) \} / T_S$$

……………沈降速度

$$dS_R(t)/dt = \{ U_S(t) - S_R(t) \cdot (Q_R(t) + Q_W(t)) \} / V_S$$

……………返送汚泥濃度

これらの式を Taylor 展開し線形化して制御ブロックを作成した。

プロセスの応答時間はSA制御で70時間、 T_s 制御では40時間となり、 T_s 制御のほうが応答が早いことがわかった。

総汚泥量制御を実装するに当って (1) T_s の設定値, (2) 通常おこなわれている間欠余剰引抜に配慮しなければならない。これらにたいして、図-3に示す T_s 目標値の決定、 T_s の計算、PI 制御、間欠引抜流量の決定の4ブロックからなる総汚泥量制御方式を提案する。

“Organic Load Control of the Activated Process Based on Predicted Daily Variation of Influent Load.” S. Masui, M. Shioya, T. Ohto, S. Nogita, Japan

日間流入負荷予測と曝気槽および最終沈殿池のシミュレータを用いる総汚泥量制御方式を提案する。シミュレーション解析より、本制御によって MLSS の変

図-4 General Flow of TSS Applied for MLSS Stabilization Control

動を安定化 (5%偏差)、および処理水質の改善と余剰汚泥濃度の増加が期待できることがわかった。

曝気槽シミュレータは、Erickson-Fanの動力学モデルを用いたものである。沈殿池シミュレータは汚泥柱移送モデルを用いて新たに開発したものである。

MLSSを安定化するために適用した総汚泥量管理システムにおけるフロー図を図-4に示した。流入水量と水質を予測し、返送汚泥流量と余剰汚泥引抜流量を求める汚泥量管理方式を確立した。

“An Algorithm on Operation of Activated Sludge System” H. Kodate, R. Nakayama, T. Shimizu, Japan

電算機で蓄積された運転データを活用するひとつの方法として、翌日24時間の運転ガイダンスを作成するアルゴリズムとそのシミュレーション結果の説明である。具体例として、曝気槽の MLSS を一定に保持す

下废水处理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

特集 I

ロットプラントで実験した結果、MLSS一定制御することによって、SVI および処理水に顕しい改善が見られた。実験は630リットル（4槽分画）の曝気槽をもつモデルプラント2基を用い、合成下水を使用したものである。

"Prediction Model by Grouping Method of Data Handling (GMDH) for Effluent Quality from Sewage Treatment Plant-Prediction Model of Transperency of Effluent for Automatic Control.

M. Yamamura, H. Kitagishi, T. Yamashita, M. Oishi, S. Yamakawa, E. Bamba, Y. Ose, Japan

GMDHによる処理水の透視度を予測するモデルを作成した。基準関数に相関係数を用いるRフィルター形のGMDHによる予測が一番良く、予測誤差が10%であった。

用いたデータは、曝気槽の水温、DO、MLSS、SVI、流入下水の流量、電導度、SS濃度、TOD、TOCの9つの変数で、約2年半のものである。中期に数ヶ月ほどバルキングが生じ、処理能力が変化した。このような場合にはこのRフィルター形GMDHで予測モデルを再び作ることによって解決できた。

"The Effect of Particle Substrate on Mineralization Performemce and the Formation of Excess Sludge in a Complete Mixing Aeration Tank."

I. Somiya, K. Kawamura, Japan

合田の業績を基礎に、RNAとDNAとを活性な汚泥量（active mass）のパラメータとする動力学モデルを作成した。このモデルによって、都市下水中の懸濁性有機物の影響と余剰汚泥引抜率について理論的検討をおこなった。この結果引抜率は主に汚泥滞留時間、無機化の進行度、および基質の成分の関数として表現

できた。

シミュレーション解析によって、懸濁性基質の多い時、滞留時間が長い時、および余剰引抜率が低いときそれぞれに無機化の度合は高くなる。従って無機化率を目標の値に運転する余剰汚泥引抜率が動力学モデルで求めることができ、活性汚泥プロセスの制御に使用することができる。

3 適応過程の解析と制御

"Combined Effects of Biological Solids Retention Time and Temperature on the Growth Parameter of Activated Sludge." H. Harada, J. Matsumoto, Japan

制御パラメーターである汚泥滞留日数（SRT）の増殖動力学への挙動を知るためにおこなった一連の活性汚泥馴養実験の結果の発表である。

実験は6リットル槽に各種の温度とSRTで合成下水で活性汚泥を馴養し、その呼吸速度と熱抵抗力（最大呼吸温度）および蛋白質含量を測定し、データを解析したものである。

実験データからMonod増殖式の定数である飽和定数と呼吸速度の関係は逆相関するが、その相関性はSRTが短くなると悪くなることがわかった。またSRTが短かいまたは高い温度で馴養した汚泥の熱抵抗力は低かった。さらに、水温にたいする増殖挙動から、汚泥の対応は生理学的対応より生態学的な対応が主体であると推察された。

"A New Approach to Computerized Control System for the Activated Sludge Process in Transcient State" S. M. Sheffer, K. Tsumula, M. Hirakoka, Japan

1. Sorption (1a, Enzymatic breakage) 2. Growth 3. Decay (3a. Resolubilization) 4. Predation

図-7 Schematic representation of the activated sludge biosystem (volatile part)

特集 I

下废水处理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

活性汚泥プロセスは常に過渡状態にあるといつてよい。これに対応して統計手法と物理モデルとを組合わした新制御システムを提案する。これは物理モデルにおける生物化学反応の速度定数は過渡状態では変化しているため、統計手法によって自己修正できる動的な制御システムでなければならないからである。

物理モデルの一例を図-7にしめしたが、基質の呼吸と微生物細胞の増殖および細胞の分解の主過程よりなるものである。各過程の速度パラメーターはおそらく生物量、流入基質の性質、温度や pH などの環境外乱などによって変化するから、最小自乗法によるパラメータフィッティングプログラムを制御システムに組み込み自己修正させる。しかしこの制御システムを実装するためには、生物化学反応のプロセス状態をモニターするセンサーが必要であるが、現在適切なものがない。

“An Approach to the Control of the Activated Sludge System by Use of a Succession Model.”

M. Hiraoka, K. Tsumula, Japan

活性汚泥プロセスの制御のアプローチの方途に、(1) DO や SRT のような操作変数を定値制御するもの、(2) 動的数式モデルより制御方案を作成するもの、とがある。しかし長期間の制御には活性汚泥の動特性が変動するためにいづれも限界をもつ。本発表は活性汚泥システムは生態系であるから、安定状態（クライマックス）があり、安定状態間の移動（遷移）があると仮定できる。この遷移を制御する環境因子と操作因子を見出す遷移モデルを提案している。

遷移モデルを作成するために、安定状態を見出す解析方法と、遷移を制御する状態変数を検出する方法とを作成した。前者にはクラスター分析を用い、後者には

分散分析によった。もし遷移を支配する変数があるならば、その値はクラスタ間で異なりかつ分散の大きい変数を有するクラスターが遷移しやすいであろう。

二つの機場について解析し遷移モデルを作成した。1例を図-8に示す。これからこの機場での遷移の構造は次のようになっていることがわかる。

クラスタ3は当機場の理想状態である。BOD の流入が増大するとクラスタ4に移行する。また SS 流入が増大するとクラスタ2に移行する。これら2者の移行にたいして MLSS 制御すればこの遷移を制御できることがわかる。さらに負荷が増大するとバルキング状態であるクラスタ1または冬期に生じるクラスタ5に移ることが明白である。

“Theoretical Consideration for Control and Monitoring of Wastewater Treatment System” J. M. Crowther, England

下水処理場では種々の目的たとえば、ルーチン業務としての運転日誌の作成、装置トラブルや危険物の流入などの緊急事態の記録や、自動制御などのためにデータ収集がおこなわれる。本発表は下水処理に必要なデータ収集の理論についての考察である。

サンプリング周期（S）は変化を明確に把握できる長さでなければならない。その選択の基準は理論的には次の最大値以下としなければならない。

$$S_{max} = (2F)^{-1}; F \text{ はシグナルの最大振動数}$$

高い頻度でサンプリングすると“aliasing”という誤差が生じる。このような場合にはフィルターを用いて高周波の情報を消さねばならない。

デジタル化によってシグナルに量子化誤差を生じるが、8ビットであればその標準偏差は0.1%程度である。

図-8 遷移モデルの一例

下廃水処理の自動制御と水質の計測監視ワークショップ

特集 I

センサーの固有の時定数によって応答遅れによる誤差が生じる。温度計、DO計、pH計などの電気化学計器は数10秒の時定数をもつ計器である。

電気信号のサンプリングは応答遅れは小さいが、採水するシステムでは1分以上の遅れが生じる。しかし採水するセンサーは採水時間で平均するのでノイズをフィルターし好都合である。

測定器やその環境からはいるノイズは測定する物理量の変化でも測定誤差でもない。これらはデジタルフィ

ルターや平滑化によって消すことができる。

流入下水のもつ高周波変動は、槽からなる単位プロセスを通過するにしたがって低周波となるので、十分下流でサンプリングすればよい。

DO制御に影響する呼吸速度は曝気槽流量、MLSS流入BODによって変動する。プロセス、センサー、制御バルブの時定数はそれぞれ100、10、1秒であり、PI制御のシミュレーション解析では積分時間が最も重要なパラメーターであった。

水質センサ

Sensors for Wastewater Treatment Plant

大	音	透 [*]	・	植	松	誠 ^{**}
野	北	舜 ^{***}	・	土	屋	直知 ^{****}
平	塚	豊 ^{*****}				

Session 5では、下廃水処理における水質や流量などのセンサと各センサの特質を利用した制御手段及びその結果として得られる効果を主に取り上げている。

発表論文数は20件であり、国別では日本が7件で最も多く、続いて西ドイツの4件、アメリカ、イギリスの各3件、及びフランス、デンマーク、ハンガリーの各1件である。

発表は三つのパネルディスカッションに分割して行われた。以下、発表のプログラムに従って各論文の題目と要旨を紹介する。

1 Aブロック

Evaluation of Instruments for Continuous
Activated Sludge Monitoring.

by J. P. Stephanson, E. G. Luxon, B. A. Monaghan
(カナダ)

オンタリオ州廃水技術センターでの研究で、活性汚泥処理プラントでの各種 On-line Sensor の性能評価を行っている。対象のセンサは、市販の DO, pH, 温度、流量（電磁式）、SS（光学式）、及び有機物（紫外

* (株)日立製作所 機電事業本部副技師長 Toru OTO

** " 那珂工場 Makoto UEMATSU

*** " 日立研究所第11部主任研究員 S. NOGITA

**** " 大みか工場 Naonori TSUCHIYA

***** " 生産技術研究所 Yutaka HIRATSUKA