

活性汚泥プロセス水質制御の高度化

Advanced Control Systems of Activated Sludge Process for Better Effluent Quality

最近、水質規制がますます強化され、それにつれ下水処理場での水質管理が重要となっている。このため、汚泥濃度制御を中心として、水質制御技術の高度化を進めた。

まず、曝気槽の汚泥濃度を一定化するためのMLSS制御の実用化を図るため、槽の一部分に汚泥を貯留する動的汚泥貯留方式を開発した。実処理場での実験により、動的汚泥貯留方式が汚泥濃度の安定化や処理効率の改善に効果のあることが確認できた。また、プロセスの長期安定化に必要な系内汚泥量の管理については、総汚泥量制御系を立案し、その特性解析を行なった。更に、水質予測機能や水質グループ表示機能などにより、高度な水質管理を支援する水質モニタシステムを開発した。

田沼正也* Masaya Tanuma
 渡辺昭二** Shōji Watanabe
 小笠原均*** Hitoshi Ogasawara

1 緒言

海域や河川の環境保全のため、総量規制などにより水質規制が強化され、それにつれ、下水処理場での水質管理はその重要性が増している。また、省エネルギー及び処理効率向上のための技術の確立が要請されている。この要請に応ずるため、日立製作所は数年前から水質制御システムの開発を進め、例えば、DO(Dissolved Oxygen:溶存酸素)制御の実用化¹⁾、曝気槽汚泥濃度制御の理論的・実験的検討、更に下水処理プロセスの数式モデルの開発などを行ってきた²⁾。

それにより、DO制御の水質への効果及び省エネルギー効果を確認した。一方、汚泥濃度制御については、既存の設備のこともあり種々の制約から必ずしも満足できる結果が得られなかった。このため、汚泥量制御を中心とした研究を進め、曝気槽汚泥濃度の一定化のための効果的な制御方法として動的汚泥貯留制御システムを立案し、その制御効果を大規模処理場で確認した。また、水質の長期安定化のためには、プロセス内の総汚泥量の管理が不可欠であることを明らかにし、総汚泥量制御の理論的検討を行なった。更に、計算機を活用した新しいプロセス監視制御システムとして、水質予測機能などを備えた水質モニタシステムを開発した。

本稿では、汚泥濃度制御を中心としたこれらの新しい水質制御システムの制御方法とその効果について述べる。

2 水質制御の現状と課題

2.1 水質制御システムの概要

活性汚泥処理プロセスの概要を図1に示す。処理効率に影響する種々の水質変数のうち曝気槽のDOは、汚泥活性度に及ぼす影響が大きいことや処理場電力量の約60%以上を消費するブロワと関係することから、その最適な管理が重要視されている。また、槽内の汚泥濃度も有機物の除去効率に影響することから、管理指標として用いられている。その他、汚泥活性度に影響する要因としてF/M比(有機物/微生物量)、汚泥日令及びSRT(汚泥滞留時間)などが挙げられているが、それらはプロセス内の総汚泥量に関係するものであり、総汚泥量という概念で統一して考えられる。

これらの水質変数間の相互干渉を考慮し、プロセスの安定化、放流水質向上を達成できる水質制御系として、図2に示す

階層形水質制御システムの開発を進めている。すなわち、DO制御やMLSS(混合液浮遊物濃度)制御は短周期の制御により流入下水量、水質変動に対してDO、MLSSの一定化、すなわちプロセスの安定化を図る。また、処理に適したMLSSを実現するためには、それに見合った汚泥量が必要となり、この汚泥量の管理を総汚泥量制御で行なう。更には、プロセス全体の状況の的確な把握、DOやMLSSなどの目標値の選択を水質モニタシステムが支援する。

2.2 DO制御の実用化

曝気槽への送気量を調整することにより、DOを目標値に保つDO制御システムのブロック線図、及びその制御結果を図3

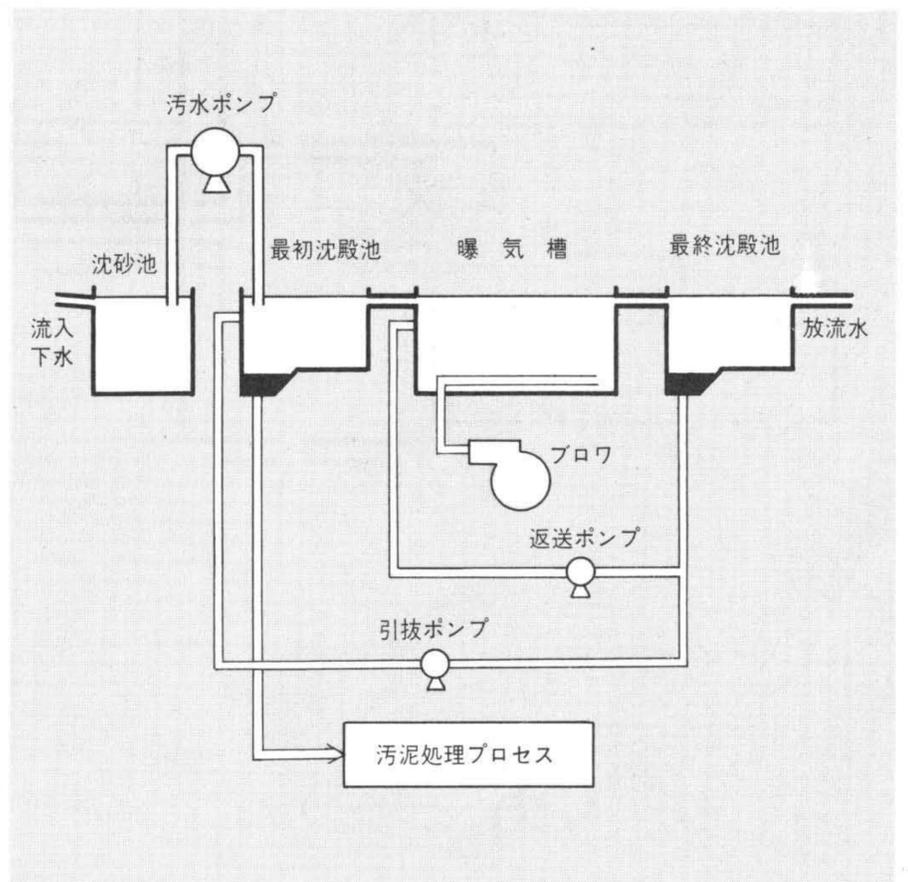


図1 下水処理プロセスの概要 活性汚泥処理プロセスは、各種ユニットプロセスから構成されるが、ここではプロセスの中心部分をなす曝気槽と最終沈殿池を検討対象とする。

* 日立製作所日立研究所 工学博士 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所大みか工場

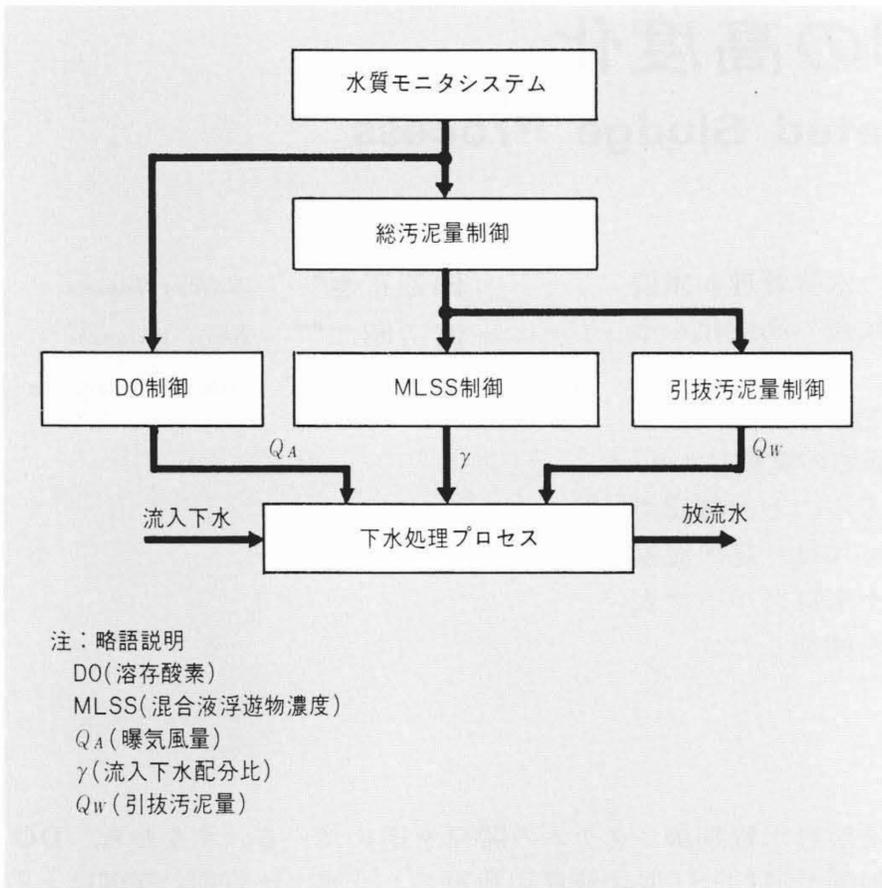


図2 階層化水質制御システム DO, MLSS制御により流入下水量の日内変動などの影響を除去し、上位機能により水質の長期安定化を図る。

に示す。同図の下部に示す制御結果から、DOは目標値付近に保たれ、DOの一定化が達成されていることが分かる。このDO制御により水質の向上が確認され、更には、省エネルギー的に、風量約10%低減という大きな効果が得られている¹⁾。

このようにDO制御は数多くの処理場で実現し、成功を収めている。しかし、流入下水量が計画水量の数分の一という新設処理場では、ブロワ容量の配分が計画水量を想定して行なわれているため、風量をDO制御に必要な風量目標値まで制御し切れないなどの問題も生じている。このことを解決するため、新設処理場でDO制御を考慮して、ブロワ容量を適切に配分するための計算プログラムを開発している。

2.3 汚泥濃度制御の課題

曝気槽のMLSSを目標値に保つため、返送汚泥量 Q_R を流入下水量 Q_0 に比例させる返送汚泥量制御や返送汚泥濃度に応じて、返送率(Q_R/Q_0)を変更する返送率制御が提案されている。返送率制御系のブロック線図を用いて理論解析を行ない、(1)原理的には、返送率制御によりMLSSを一定化できること、(2)しかし、汚泥の沈降特性が悪化した場合や沈殿池の汚泥貯留能力が小さい場合は、返送汚泥の過不足が生ずること、を明らかにした³⁾。既処理場では、上記(2)が問題となり、必ずしも期待すべき結果が得られていない。

一方、引抜汚泥量 Q_w を用いた余剰汚泥量制御として汚泥

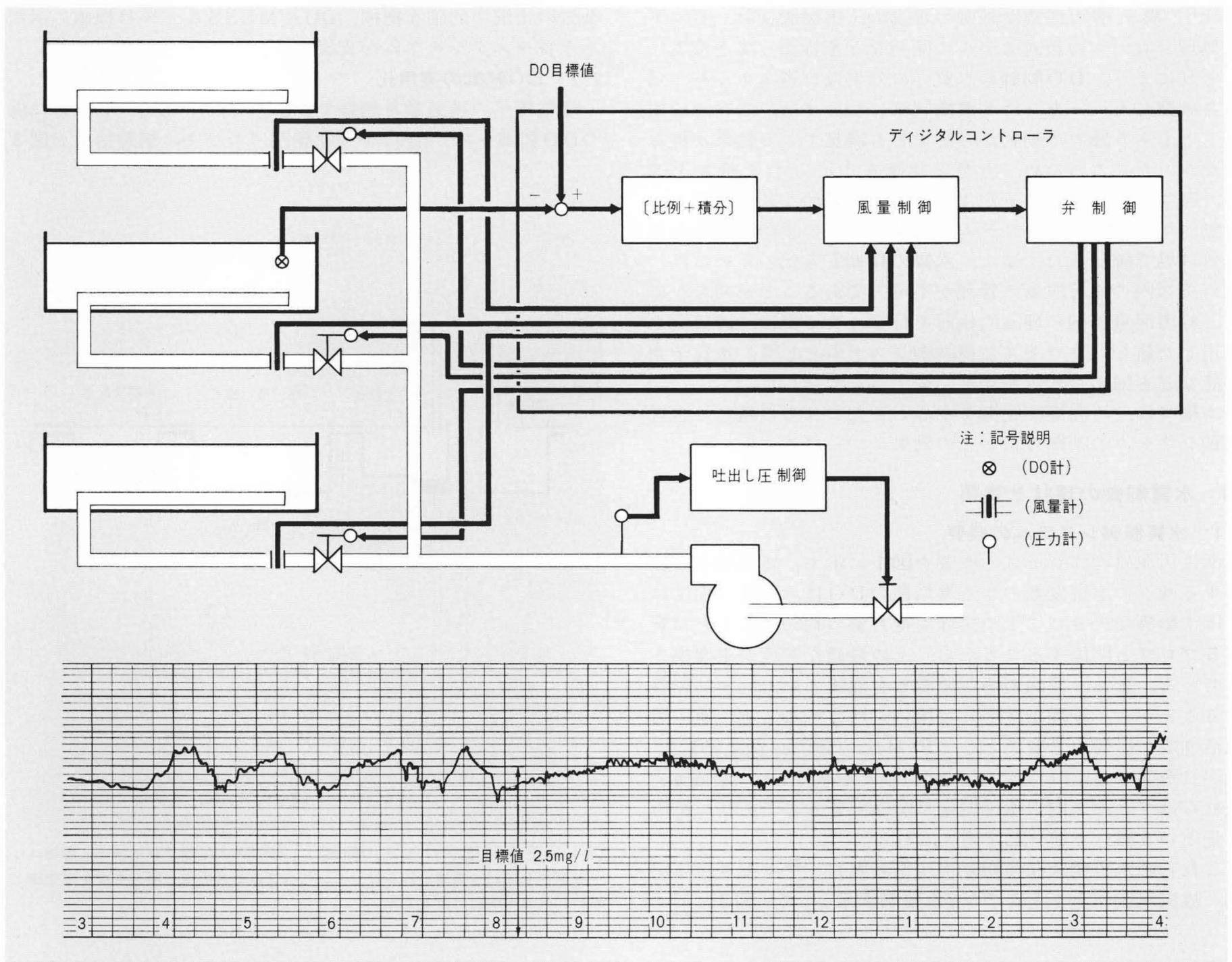


図3 DO制御とその効果 DO制御により、曝気槽のDOが目標値に制御され、プロセスが安定化していることが分かる。

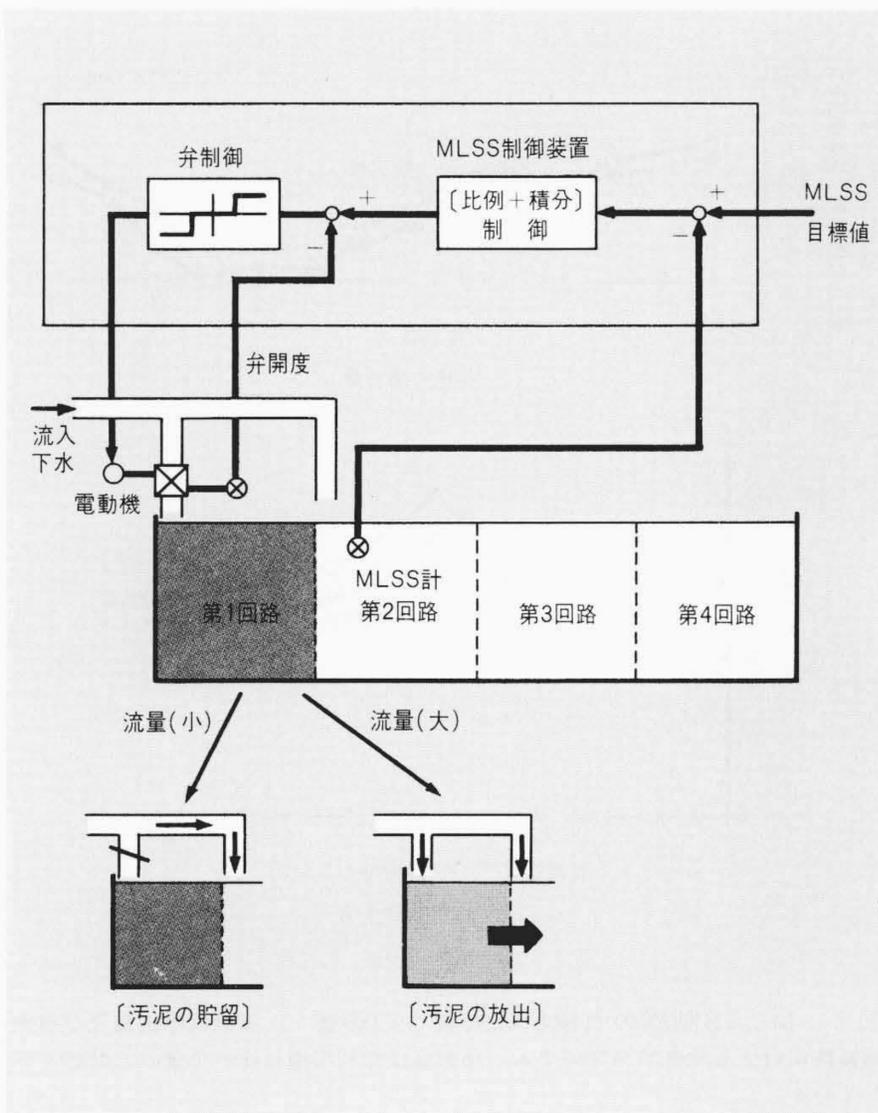


図4 汚泥貯留方式を用いたMLSS制御系 流入下水量に応じて、第1回路に汚泥を貯留又は汚泥の放出を行ない、下流のMLSSの一定化を図る。

日令制御が検討されているが、その制御特性やMLSS制御との関連がまだ明確にされていない。

このような、汚泥濃度制御に関する状況を考慮すると、次のような課題を早急に解決しなければならないことが分かる。

- (1) 沈殿池の貯留能力など、種々の設備上の制約に対処できるMLSS制御システムの開発
- (2) 余剰汚泥制御の特性把握とその役割の明確化

3 動的汚泥貯留方式を用いた汚泥濃度制御

3.1 動的汚泥貯留方式の原理

既設処理場で返送汚泥量を用いたMLSS制御を行なうとすると、沈殿池での汚泥量の過不足が問題になることが多い。この問題を解決するためには、汚泥貯留槽を設けて返送汚泥量の調整範囲を広げることが必要であるが、建設費や用地確保の点から非常に難しい。

動的汚泥貯留方式は、曝気槽の一部を汚泥貯留槽として利用するもので、図4に示すように第1回路と第2回路への流入下水量 Q_0 の配分比を調整することにより汚泥貯留を実現する。すなわち、流入下水量 Q_0 が減少したときは、第1回路への流入下水の配分比を減少し第1回路に汚泥を貯留する。これにより、第1回路から第2回路へ流下する汚泥量が減少するので、第2回路でのMLSSの増加が防止される。逆に、 Q_0 が増加したときは第1回路への流入下水量の配分比を増加し、貯留汚泥を下流へ押し出し、第2回路MLSSの減少を防止する。

このように、貯留汚泥量の制御を流入下水量の配分比によって行なうことに、動的汚泥貯留方式の特長がある。

3.2 動的汚泥貯留方式を用いたMLSS制御システム

上述した方法により、MLSSの一定化を図るMLSS制御

システムのブロック線図を図4に示す^{4)~6)}。このシステムでは、第2回路入口付近に設置したMLSS計によるMLSSと目標値とを比較し、MLSSが目標値よりも高い場合は、第1回路への下水流入口に設けられた制御弁を閉じ、第1回路へ汚泥を貯留しMLSSの増加を防ぐ。逆に、MLSSが目標値よりも低い場合は、制御弁を開き貯留汚泥を流下させ、MLSSの低下を防止する。

このシステムでは、MLSS計が第2回路入口付近に設置されており、操作の影響が短時間で検出できるので、図4に示すように[比例+積分]制御で十分な効果を挙げられる。曝気槽は通常押し流れなので、第2回路のMLSSを一定化することにより、第2回路から出口までのMLSSを一定化できる。

本方式の特長を列挙すると、次のようになる。

- (1) 汚泥貯留槽を設置する必要がない。
- (2) 設備改造は第1回路流入口への電動制御弁の設置だけであり、簡単かつ短時間で実施できる。
- (3) 制御方式が簡単であり、アナログ調節計又はマイクロコンピュータにより容易に実現できる。

3.3 MLSS制御の実験

動的汚泥貯留制御方式の実用性を確認するため、処理水量 $12,000\text{m}^3/\text{d}$ の中規模処理場と $45\text{万}\text{m}^3/\text{d}$ の大規模処理場で実験が行なわれた。大規模処理場での実験では、DO制御との干渉も検討するため、代表槽によるDO制御系を併用した。以下、大規模処理場での実験結果について述べる^{6),7)}。

(1) 汚泥貯留方式の妥当性の確認

曝気槽の第2回路のMLSS目標値を、 $850\text{mg}/\text{l}$ に設定した場合の制御効果を図5に示す。第1回路への流量制御弁は流入下水量に対応した動作を示している。すなわち、流量減少時には制御弁が閉じ、汚泥貯留を行なっている。逆に、増加時には制御弁が開き、貯留された汚泥を下流へ押し出している。

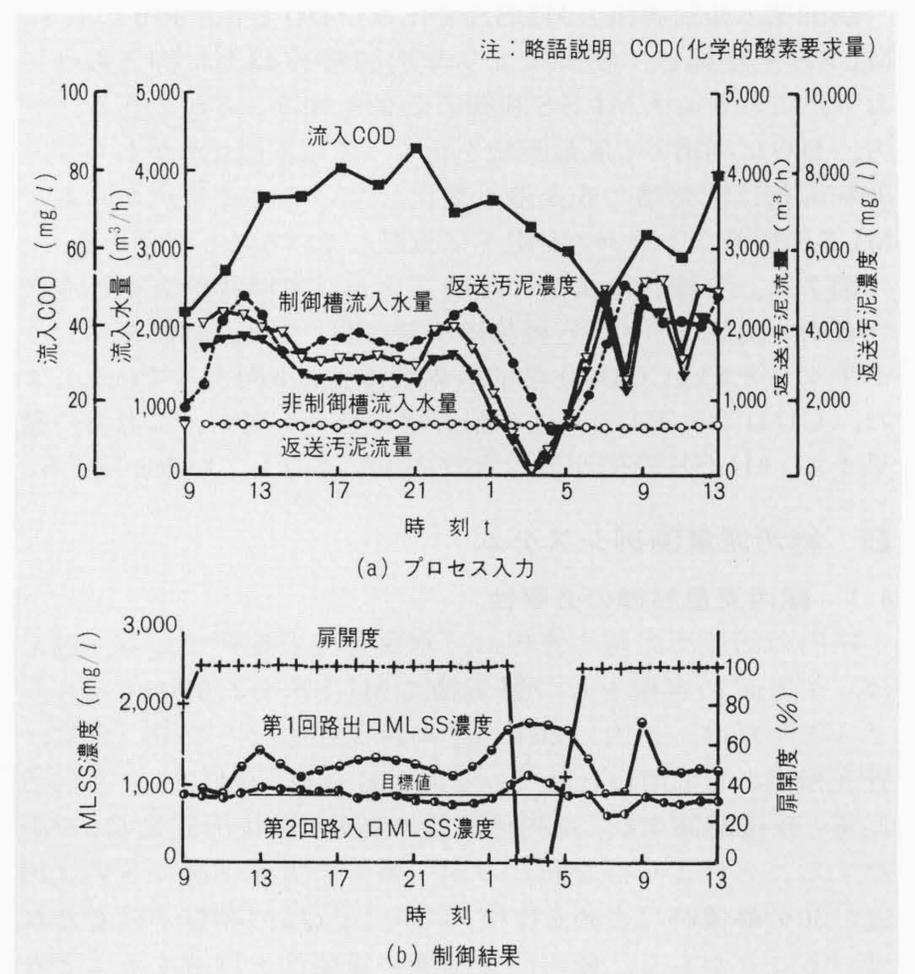


図5 MLSS制御の結果 流入下水量や第1回路出口MLSSの大幅変化にもかかわらず、第2回路入口のMLSSが動的汚泥貯留方式により目標値付近に保持されている。

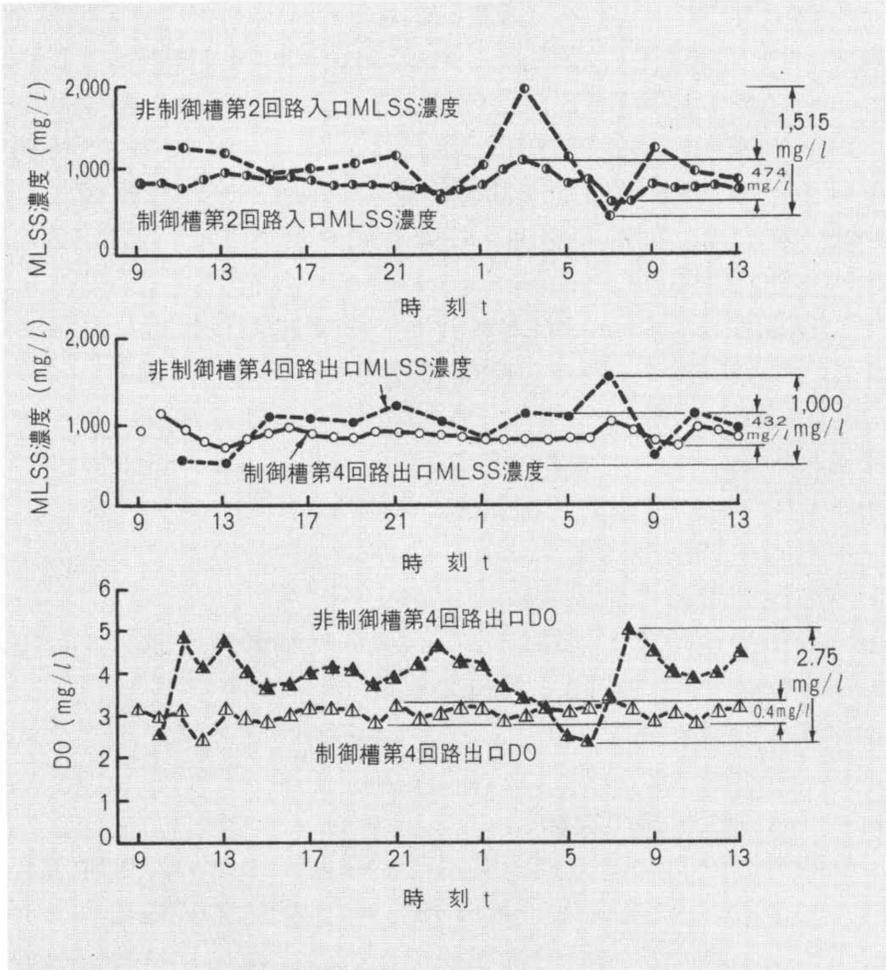


図6 制御槽と非制御槽の水質比較 MLSS制御により、MLSS変化幅は非制御槽の43%に、DO変化は14%にそれぞれ抑えられている。

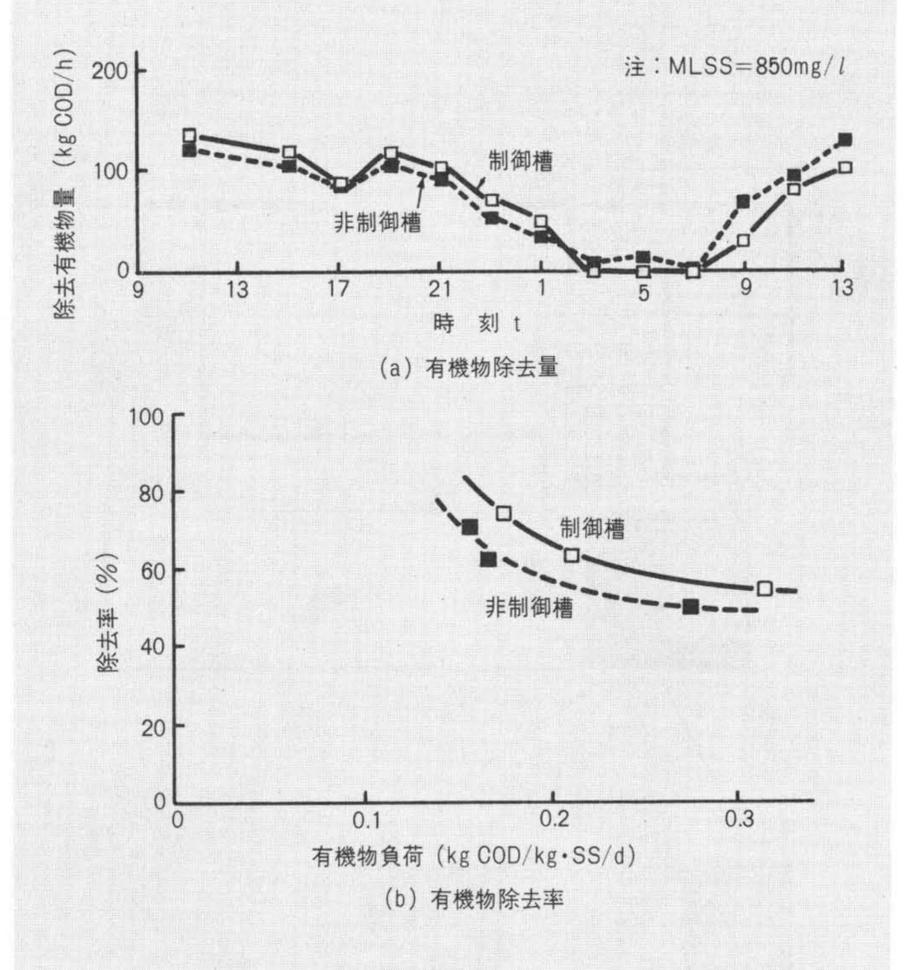


図7 MLSS制御の有機物除去量への影響 有機物除去量及び有機物負荷に対する除去率の関係でも、制御槽は非制御槽に比べて優れた特性を示している。

る。この制御弁の働きにより、流入下水量に大幅な変化が生じた図5の下段に示すように第1回路出口のMLSSが大きく変動しているにもかかわらず、第2回路のMLSSは目標値付近に保持されている。これらのことから、汚泥貯留方式によるMLSS制御は、MLSSの安定化に効果があると言える。

(2) MLSS制御の水質への影響

制御槽と非制御槽のMLSS変化及びDO変化を図6に示す。MLSS変化幅は、制御により非制御槽の43%に抑えられており、これからもMLSS制御の効果を知ることができる。一方、DOは両槽とも風量調整を行なっているにもかかわらず、非制御槽は制御槽の6.8倍も変化している。この点からも、MLSS制御はプロセス安定化に貢献していることが分かる。

図7に、有機物除去量の経時変化及び有機物除去率と有機物負荷の関係を示す。有機物除去量に関しては、制御槽のほうが平均で8.8kgCOD(化学的酸素要求量)/h向上している。また、COD除去率についても制御槽のほうが高い。これらの結果から、MLSS制御が放流水質向上に寄与していると言える。

4 総汚泥量制御システム

4.1 総汚泥量制御の必要性

系内の活性汚泥量の管理は、水質管理上重要である。例えば、1万m³の容積をもつ曝気槽でMLSSを2,000mg/lにしようとするれば、系内に20t以上の汚泥が必要となる。更に、管理指標として用いられている汚泥日令やF/M比も、系内汚泥量と直接関係する。系内汚泥量の変更は引抜汚泥量Q_wを調整することにより行なわれるが、多くの実処理場でSV₃₀(汚泥の30分静置時に占める容積)に基づくQ_wの調整が行なわれていることから、総汚泥量制御の重要性を理解することができる。

4.2 総汚泥量制御システム

引抜汚泥量Q_wを用いた汚泥量制御としては、必要なQ_wを

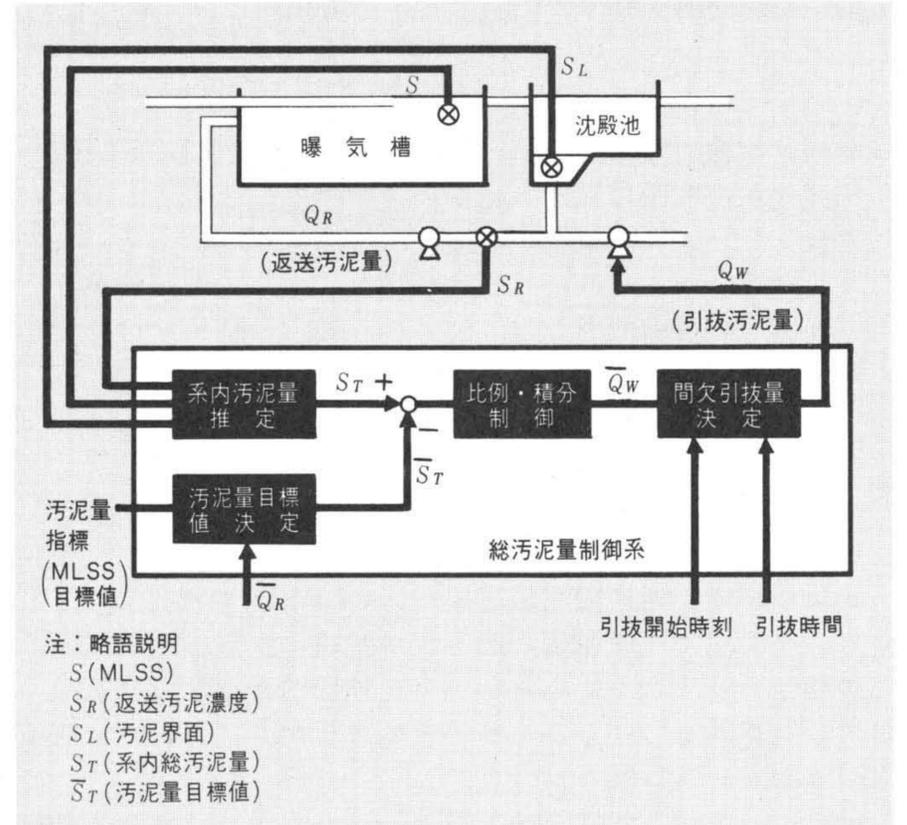


図8 総汚泥量制御システム 系内の汚泥量を適正值に保つことにより、プロセスの長期安定化を図ることができる。

計算して設定する引抜汚泥量設定制御、汚泥日令制御及び系内の総汚泥量を計測してQ_wを調整する総汚泥量制御がある。応答特性を解析した結果、図8にそのブロック線図を示す総汚泥量制御が、応答性の点で最も優れていることが明らかになった⁸⁾。同図の各ブロックは以下の機能をもつ。

(1) 総汚泥量目標値の決定

系内の汚泥量に関する指標(例:汚泥日令, F/M値)が設定された場合、それが実現できる系内汚泥量目標値S_Tを決

定する。本稿では、MLSSの目標値が設定された場合、そのMLSSを実現するのに必要な \bar{S}_T を次のように計算する。

$$\begin{aligned} \bar{S}_T &= [\text{曝気槽汚泥量}] + [\text{沈殿池汚泥量}] \\ &= \bar{S} V_{AT} + \alpha \{ (\bar{S} - \Delta \bar{S}) (Q_0 + \bar{Q}_R) - Q_0 \bar{S}_0 \} / \bar{Q}_R^2 A_S / 2 \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

- ここに \bar{S}_T : 総汚泥量目標値 (g)
- V_{AT} : 曝気槽容積 (m³)
- ΔS : 汚泥増殖量 (固定)
- Q_0 : 流入下水量 (m³/h)
- \bar{Q}_R : 返送汚泥量の1日平均値
- A_S : 汚泥ピット表面積 (m²)
- α : 汚泥界面 S_L と返送汚泥濃度 S_R の間の比例係数

(2) 総汚泥量の現在値推定

MLSS, 返送汚泥濃度, 汚泥界面の実測値 S, S_R, S_L を用いて推定する。

$$\bar{S}_T = S V_{AT} + S_R \cdot S_L \cdot A_S / 2 \dots\dots\dots(2)$$

(3) 引抜汚泥量の目標値 \bar{Q}_W の計算

S_T と \bar{S}_T の偏差に応じて、[比例+積分]演算により、 \bar{Q}_W を求める。

$$\bar{Q}_W = K_P (S_T - \bar{S}_T) + \int K_I (S_T - \bar{S}_T) dt \dots\dots\dots(3)$$

- ここに K_P, K_I : 比例, 積分ゲイン
- t : 時間

(4) 間欠引抜量の決定

連続引抜時には、(3)式で計算した \bar{Q}_W を用いて制御を行なう。一定時間だけ汚泥引抜を行なう間欠引抜では、1日の汚泥の全引抜量が(3)式による1日汚泥引抜量計算値と等しくなるように Q_W を決定し、制御を実行する。

4.3 総汚泥量制御のシミュレーション⁹⁾

総汚泥量制御のシミュレーションを行ない、その基本特性を把握した。間欠引抜時での目標値変化及び流入下水量変化に対するシミュレーション結果を図9に示す。同図には、連続運転時の状態変化を点線で表わしている。シミュレーション結果をまとめると次のようになる。

- (1) 総汚泥量制御は、連続運転及び間欠運転時のいずれも安定に行なえる。
- (2) MLSS目標値変化に対する時定数は50時間である。
- (3) 流入下水量の増加に対しても、総汚泥目標値を変更することにより、MLSSを目標値に保てる。

総汚泥量制御の目標値計算アルゴリズムを変更することにより、F/M制御や汚泥日令制御を実現することも可能である。

5 水質モニタシステム

5.1 システム構成

各地の処理場に計算機が導入されるにつれ、CRT(Cathode Ray Tube)ディスプレイ装置を用いた中央監視システムが普及しつつある。このような計算機を活用した中央監視システムは、場内で収集されたデータを組み合わせることでCRT画面に表示でき、また履歴も容易に表示できるなど種々の長所をもち、更に、データ表示方法や蓄積データの利用方法を改良することにより、より高度な水質管理を可能とする。

計算機の有効利用の一環として、図10に示す水質モニタシステムを開発した。このシステムは、水質レポート機能、水質予測機能及び水質グループ表示機能をもつ。これらの機能はそれぞれ、データベースから水質データを索引し、必要な処理を行ない、結果をCRT画面に表示する。運転員は表示された結果を基に、プロセス異常の有無や将来の水質変化を把握し、必要な場合は、上述した水質パラメータ

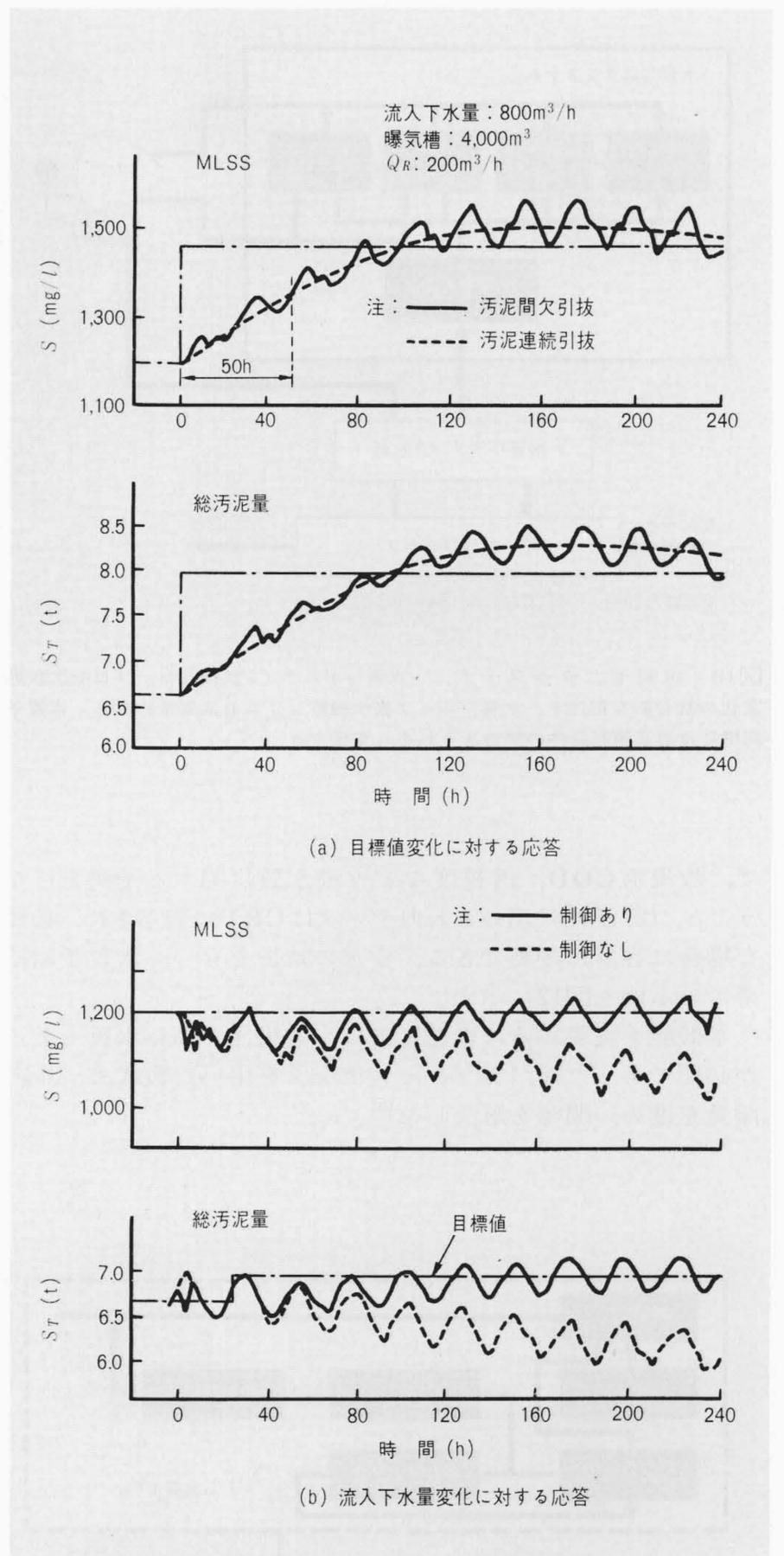


図9 総汚泥量制御系の応答特性 シミュレーション結果から、総汚泥量制御系が目標値変化や外乱に対して良好な制御動作を示すことが分かる。

制御の目標値を変更することにより、プロセス状態の調整を行なう。

5.2 水質予測機能

流入下水量などのプロセス入力が増加した場合やプロセスに操作を加えた場合、プロセス状態がそれによりどのように変化するか予測することは、応答が非常に遅い下水処理プロセスの管理を行なう上で効果的である。

水質予測機能は、図11に示すような構成をもつ水質動的モデルを用いて水質の時系列変化を計算し、結果をCRT上に表示する。例えば、流入下水量と水質の予測値並びに運転員からの返送汚泥量及び引抜汚泥量に関する指示値を用いて、水質動的モデルを数日間にわたって計算する。この機能は、(1) DO, MLSSや返送汚泥濃度などの水質パラメータに加え

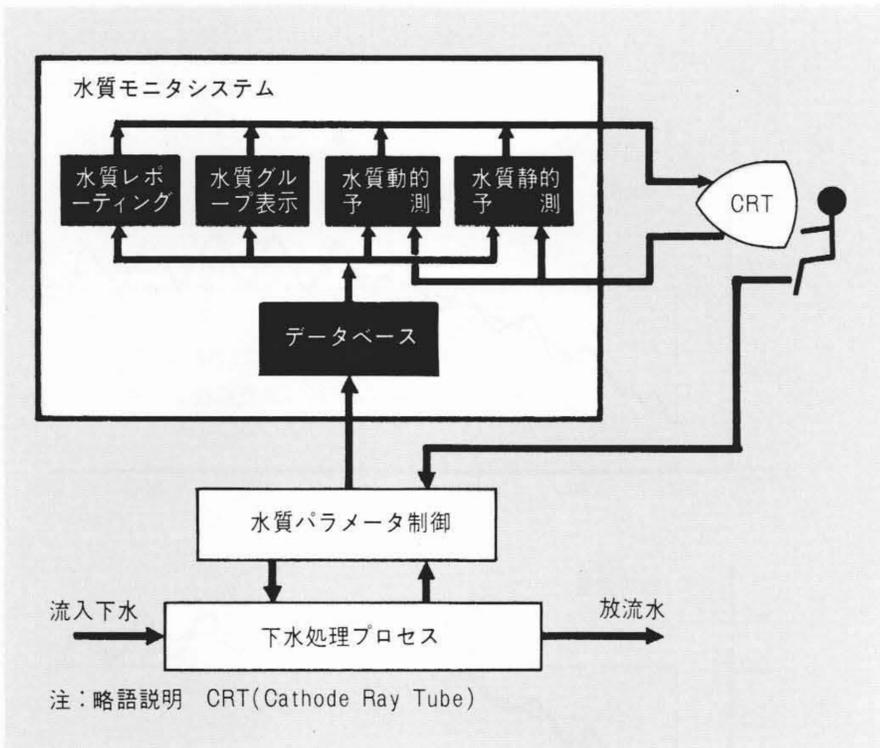


図10 水質モニタシステム 水質レポートティング機能は、プロセス状態変化の総合的な把握を、水質グループ表示機能はプロセス異常診断を、水質予測機能は適正運転条件の探索をそれぞれ支援する。

て、放流水COD、透視度など放流水質に関する予測を行なうこと、(2)予測に用いる入力データはCRTに表示され、必要な場合は容易に変更できる、などの特長をもつ。水質予測結果の表示例を図12に示す。

本機能を実現するに当たっては、実用性の高い水質モデルが必要であったが、実プロセスデータを用いた数式モデルの開発を進め、問題を解決した¹⁰⁾。

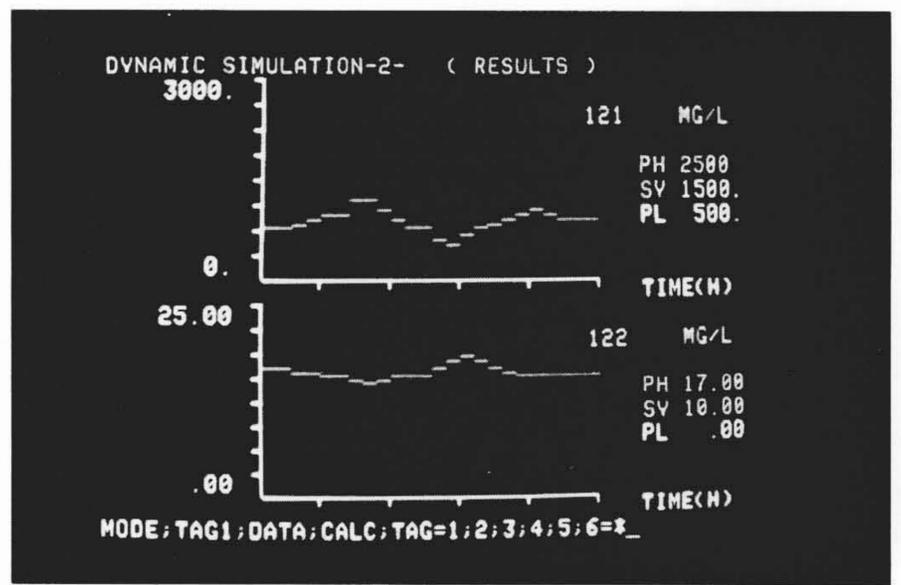


図12 動的予測結果の表示画面 MLSS、放流水CODに関する予測結果がカラー表示される。

5.3 水質グループ表示機能

活性汚泥処理プロセスでは、水質変数が相互干渉するため、水質悪化の原因を突き止めることが容易でない。水質グループ表示機能は、このような問題を解決するため、関連変数の索引及び表示を行なうものであり、ある水質変数名が指名された場合、それに影響する要因を索引する。例えば、DOが指定された場合、曝気風量、流量、MLSSが索引され、それらの値が棒グラフでCRTに表示される。

本機能により、プロセスが異常状態に陥った場合、その原因究明がシステマ的に行なえる。

6 結 言

活性汚泥処理プロセスでの高度水質制御システムとして、動的汚泥貯留制御システム、総汚泥量制御システム及び水質モニタシステムで構成される階層形システムを提案し、各制御システムの基本方式、制御効果について述べた。

現在、これらの制御システムは、実処理場でその効果が実証されつつあり、水質向上に今後いっそう寄与するものと期待される。

最後に、水質制御システム開発のため、種々御協力をいただいた関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 長崎, 外: 活性汚泥プロセスの水質制御, 日立評論, 59, 643~648 (昭52-8)
- 2) 加藤, 外: 下水処理プロセスの総合水質制御システム, 日立評論, 59, 649~654 (昭52-8)
- 3) 加藤, 外: 返送率制御の特性解析, 第15回下水道研発(昭53)
- 4) 地田, 外: MLSS制御に関する一試案, 第11回下水道研発(昭49)
- 5) 日本下水道事業団試験部報(昭53)
- 6) 東京都下水道局: 三河島処理場藍染系東側処理場施設における自動制御に関する調整, 運転調査報告書(昭54-3)
- 7) 加藤, 外: 動的汚泥貯留方式によるMLSS制御, 第17回下水道研発(昭55)
- 8) 田沼, 外: 余剰汚泥量制御の特性解析, 第16回下水道研発(昭54)
- 9) 田沼, 外: 間欠引抜きを伴う総汚泥量制御の特性解析, 第17回下水道研発(昭55)
- 10) M. Tanuma, M. Kashiwagi and S. Kato: Mathematical Model of Activated Sludge Process and Its Application, ISA '78 Annual Conference (1978)

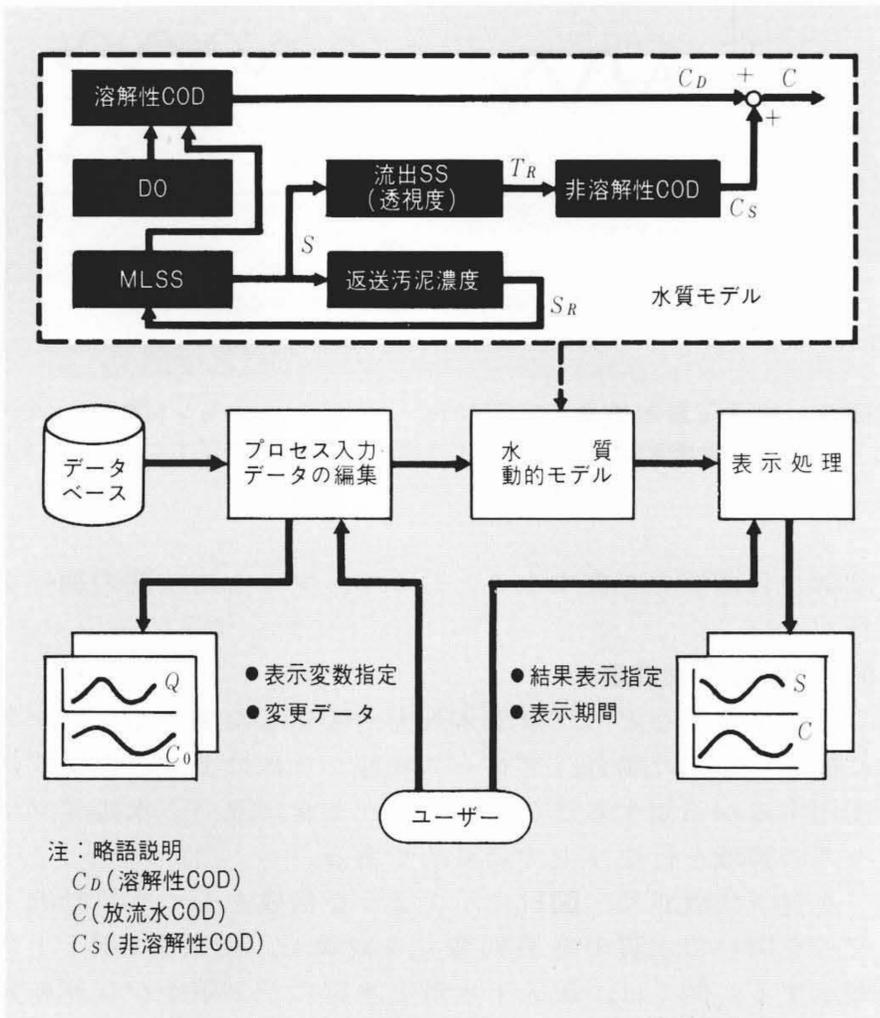


図11 水質予測機能 動的モデルにより、数日間先までの水質予測が行なわれ、CRTに表示される。操作量の選択と計算の繰返しが行なわれるように、プロセス入力及びその変更のためのガイダンス画面が表示される。