

下水処理プロセスの総合水質制御システム

Total Water Quality Control for Wastewater Treatment Process

下水処理プロセスでは、水質向上のため溶存酸素(DO)制御などの水質パラメータ制御が普及しつつあるとともに、水質制御の高度化が望まれている。水質パラメータ制御を統括し、放流水質の最適化を目指す総合水質制御システムについて、その全体構成を示した。

総合水質制御を実現するために必要な水質モデルについては、DO、混合液浮遊物濃度(MLSS)及び有機物濃度の挙動を示すばっ気槽モデル並びに透視度、返送汚泥濃度の変化を表わす沈殿池モデルを導き、実プロセス・データでその妥当性を立証した。更に、総合水質制御のサブシステムとなる汚泥量制御水質、オペレーション・ガイド・システムについて、その具体化の方法を述べた。

加藤修嗣* *Katô Shûji*
 田沼正也** *Tanuma Masaya*
 野北舜介** *Nogita Shunsuke*
 塩谷 真*** *Shioya Makoto*
 筒井和雄**** *Tsutsui Kazuo*

1 緒 言

下水処理プロセスでは、プロセスの安定化、水質の向上などのため水質制御の必要性が高まり、各種水質制御の開発が試みられている。このうち、プロセスの処理効率に強い影響を持つ溶存酸素(以下、DOと略す)、混合液浮遊物濃度(以下、MLSSと略す)制御については、既に実用化している¹⁾。更に、このような水質パラメータ制御をベースにして、より高い処理効率を目指す総合的な水質制御についても検討中である。基質負荷制御、汚泥量管理、更に放流水質制御がこれに含まれる。これらの制御については、理論的検討が主であったが、水質計器の開発が進んでいることや、計算機の導入が進んでいることなどもあって、その実現性が高まっている。また、このような高度な水質制御のために必要なプロセス・データの蓄積そのデータを用いたモデルの開発も進んでいる。

以下、現在開発を進めている総合水質制御システム、及びオンライン用水質モデルの現状と動向について述べる。

2 総合水質制御システムの構成

2.1 水質制御の今後の課題

図1の下水処理プロセスでは、処理効率を最大に保ち、放

流水質を良くすることが最大の使命である。しかし、処理効率の最適化制御を現在実現するには、幾つかの問題がある。例えば、水質指標として用いられている生物化学的酸素要求量(BOD)や化学的酸素要求量(以下、CODと略す)などは、連続測定が難しいことが挙げられる。また、プロセス・データの蓄積が少ないため、プロセス特性の解明が進んでいないことも障害であった。このため、まず測定が容易なDO、MLSSの制御を試み、それが処理効率の向上や省エネルギーに有効であることを確認した¹⁾。

今後は、これらの制御をベースにして、より高度な制御システムの開発に進んでいくが、DO制御、MLSS制御の経験から考えて、次のような制御が必要と思われる。まず、DO制御については、その技術は一応確立したので、今後は処理効率や処理費用から見た最適DO値の探索に進む必要がある。汚泥濃度の制御については、流入下水量の日間変動に対してMLSSを一定化することができつつあるが、それについても汚泥量の不足や返送汚泥量の操作範囲などの問題があり、MLSSを変化させる基質負荷(以下、F/Mと略す)制御については、今後検討しなければならない課題が多い。なお、プロ

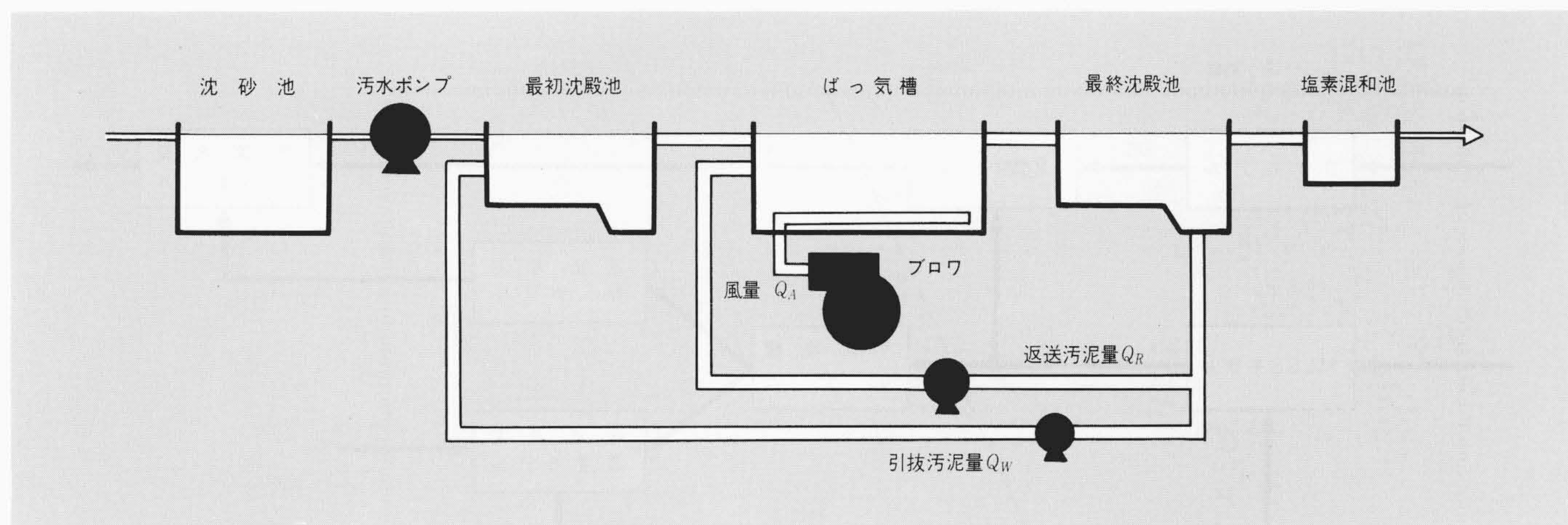


図1 下水処理プロセスの概要 都市下水の処理に主に用いられている活性汚泥処理プロセスの概要を示す。

* 東京都下水道局整備拡充部電機設計課 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所システム開発研究所 **** 日立製作所大みか工場

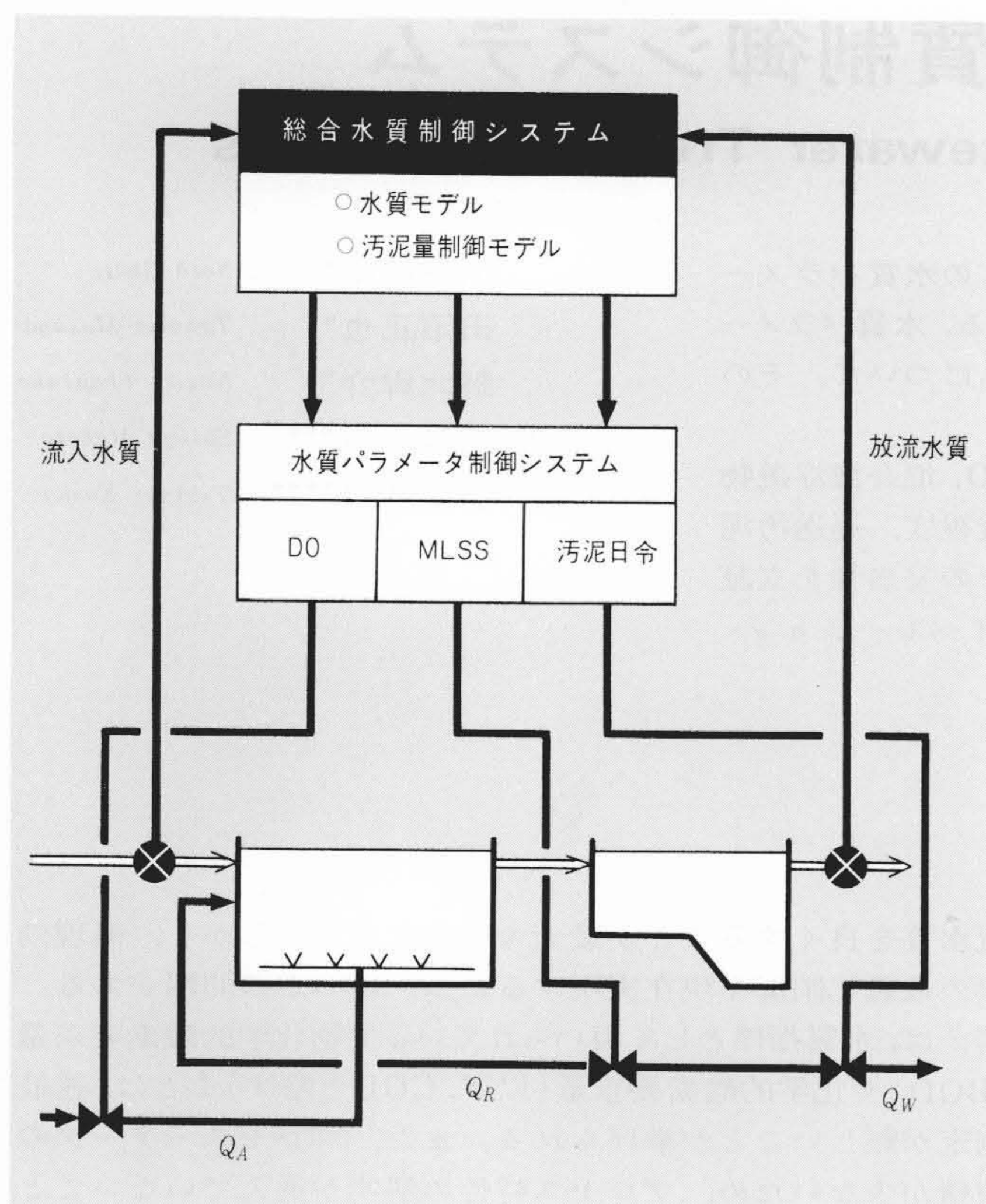


図2 総合水質制御システムの構成 総合水質制御システムは、最適設定値を与える総合水質制御と、この設定値に対して追値制御を行なう水質パラメータ制御の階層システムとで構成される。

セスを安定に運用するには、プロセス全体の汚泥量を適正に保つ必要があるが、このための長期的な汚泥量管理²⁾については、まだ解明されていない部分が多く、今後の重要課題の一つである。このようなプロセス制御が進むにつれ、下水プロセス制御の最終目標である総合的放流水質制御システムの実用が可能となる。また、その前段階として、プロセス状態の将来予測値を運転員に指示する水質オペレーション・ガイド・システムの開発も有効であろう。

2.2 総合水質制御システムの構成

DO、MLSS制御をベースにして、各種水質制御が今後開発されるが、それらを有機的に結合して、高度な機能を持つ総合的な制御システムを構成する必要がある。総合水質制御システムとして、図2に示すような階層構成を持つシステムが考えられる。このシステムでは、流量の日間変動などの早い外乱に対しては、DO、MLSS制御などの下位制御系で対処し水質の一定化を図る。プロセスの長期的な安定を図るための汚泥量の確保は、汚泥量モデルを用いた汚泥量制御で行なう。更に、プロセス全体の特性を考慮して処理効率を向上させるため、水質モデルを用いた水質オペレーション・ガイド又は放流水質制御が行なわれる。このような総合水質制御システムは、各マイナ制御間の協調がとれ、処理効率の最適化が望めることや開発した制御を順次実施して、制御の高度化が図られるなどの利点がある。

以下では、総合水質制御システムを実現するために必要な水質モデル、汚泥量制御などについて現状を述べる。

3 水質モデル

3.1 水質モデルの構成

下水中の有機物は、図1のばっ気槽で活性汚泥により吸収消化され減少する。その濃度は、ばっ気槽のMLSS及びDOに影響される。ばっ気槽から出た混合液は、沈殿池で処理水と汚泥に分離される。汚泥の大部分は沈降し一部分が流出するが、その流出汚泥は非溶解性有機物となるので、できるだけ少なくする必要がある。沈殿池の処理効率は、沈殿池への負荷、堆積汚泥量により影響される。沈降汚泥は、ばっ気槽へ返送されるが、その返送汚泥濃度も重要なプロセス変数である。

このような下水処理プロセスの特性を表わすには、図3に示すような水質モデルが必要である。

3.2 ばっ気槽モデル

(1) MLSSモデル

ばっ気槽のMLSSは、槽の頭部での汚泥収支と輸送中の汚泥増殖量が計算できれば予測できる。このうち、汚泥増殖量はその量が小さいこと各種要因が影響することから予測が難しい。従来、Monodのモデルなどが使われていたが、我々は

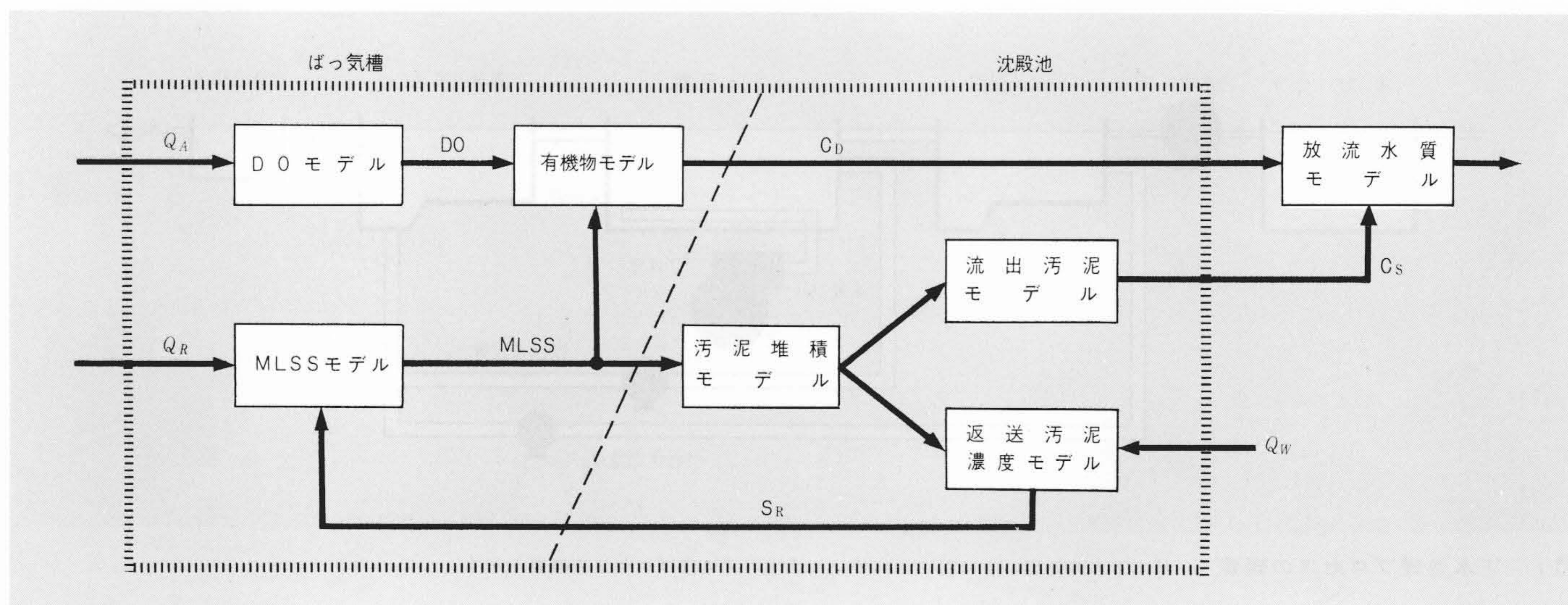


図3 水質モデルの構成 プロセス特性は、幾つかのサブモデルを含むばっ気槽モデルと沈殿池モデルにより表わされる。

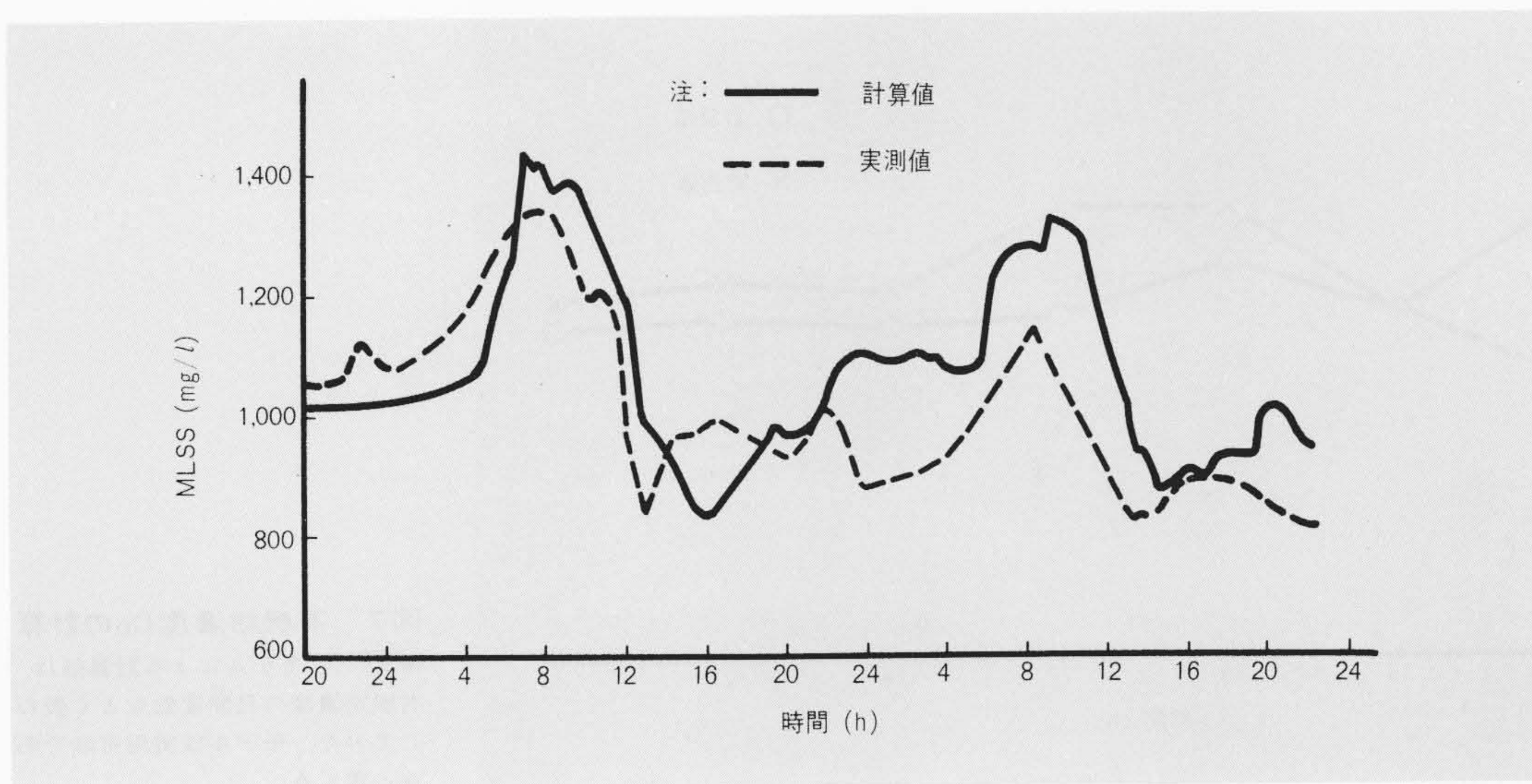


図4 MLSSの計算結果
モデルによる計算結果は、実測値の変化をよく表わしており、モデルが妥当であることが分かる。

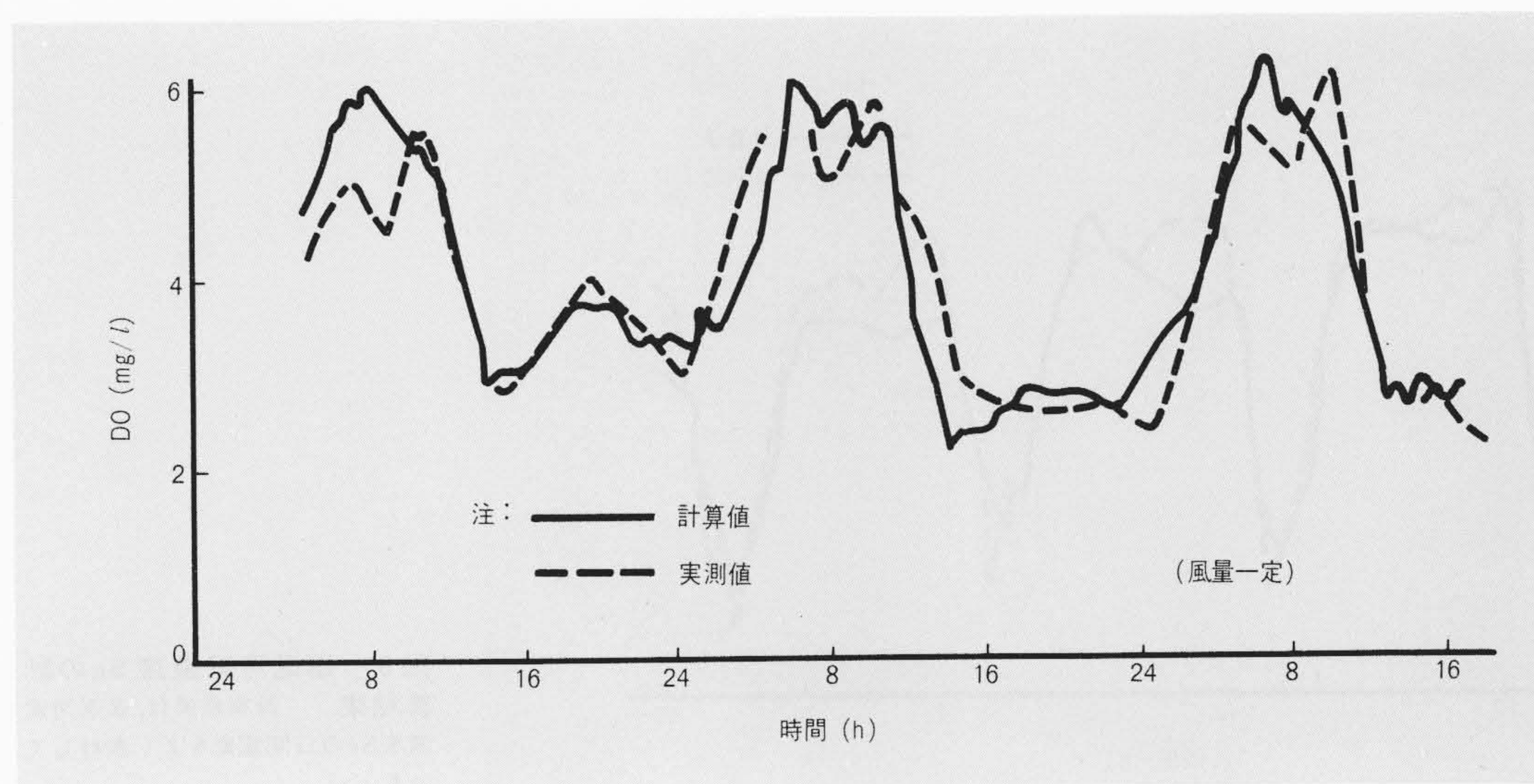


図5 DOの計算値と実測値の比較 DOの計算値は実測値によく追従しており、モデルが妥当であることが分かる。

実用的観点から一定であると仮定し、また汚泥収支式に平滑化手法を適用した表1のモデルを導いた³⁾。モデルによる計算値は、図4に示すように実測値によく一致しており、モデルは実用可能と言える。

(2) DOモデル

ばっ気槽のDOは、流量 Q 、風量 Q_A 、流入有機物濃度などにより影響される。これまで、各種モデルが使われているが、我々は測定が容易な変数だけから簡単に計算できるモデルの開発を目的として、 Q 及び Q_A の過去数時間の値を含めた回帰分析を行ない、実用的モデルを導くことができた。DOの計算値と実測値の比較を図5に示すが、計算値は実測値によく一致している。

(3) 有機物濃度モデル

溶解性有機物濃度(以下、 C_D と略す)に強い影響を持つのはMLSSであり、MLSSが大きくなると C_D が小さくなる。 C_D の変化については、従来多くの解析が行われてきたが、実プロセス・データで検証した例は少ない。一方、ばっ気槽内部の C_D の分布を測定した結果、図6に示すように初期吸収が大きな役割を果たすこと、また従来モデルでは滞留時間の影響を過大に評価しがちであることが分かった。我々は、簡単なモデルでこの現象を表わすため、有機物除去はすべて初期

吸収により行なわれると仮定した表1のモデルを導いた⁴⁾。モデルによる計算値は、図7に示すように実測値によく一致しており、モデルは実用可能と言える。

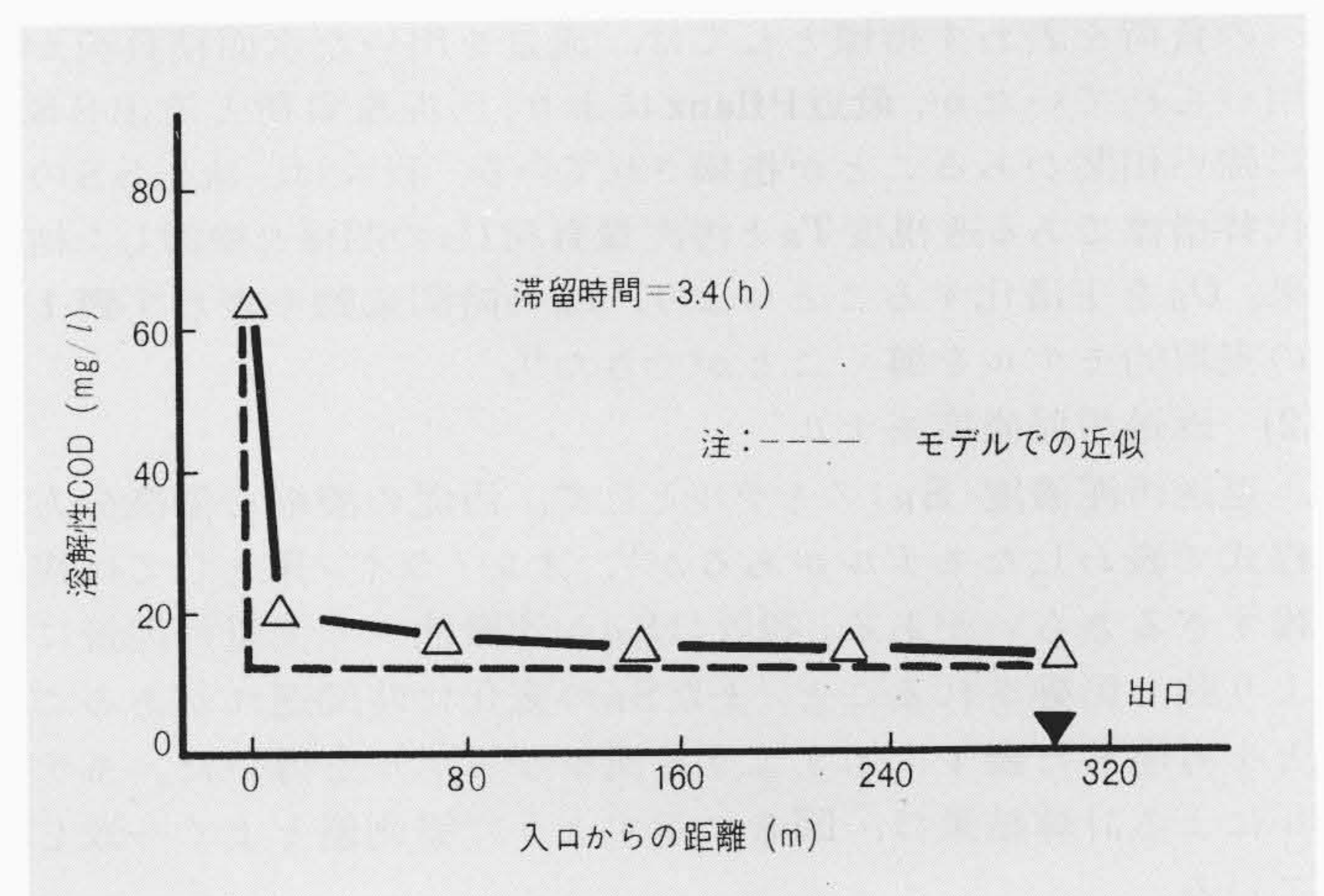


図6 ばっ気槽内部の有機物濃度 C_D 分布 ばっ気槽頭部で大部分の有機物が除去され、初期吸収が大きな役割を果たしていることが分かる。

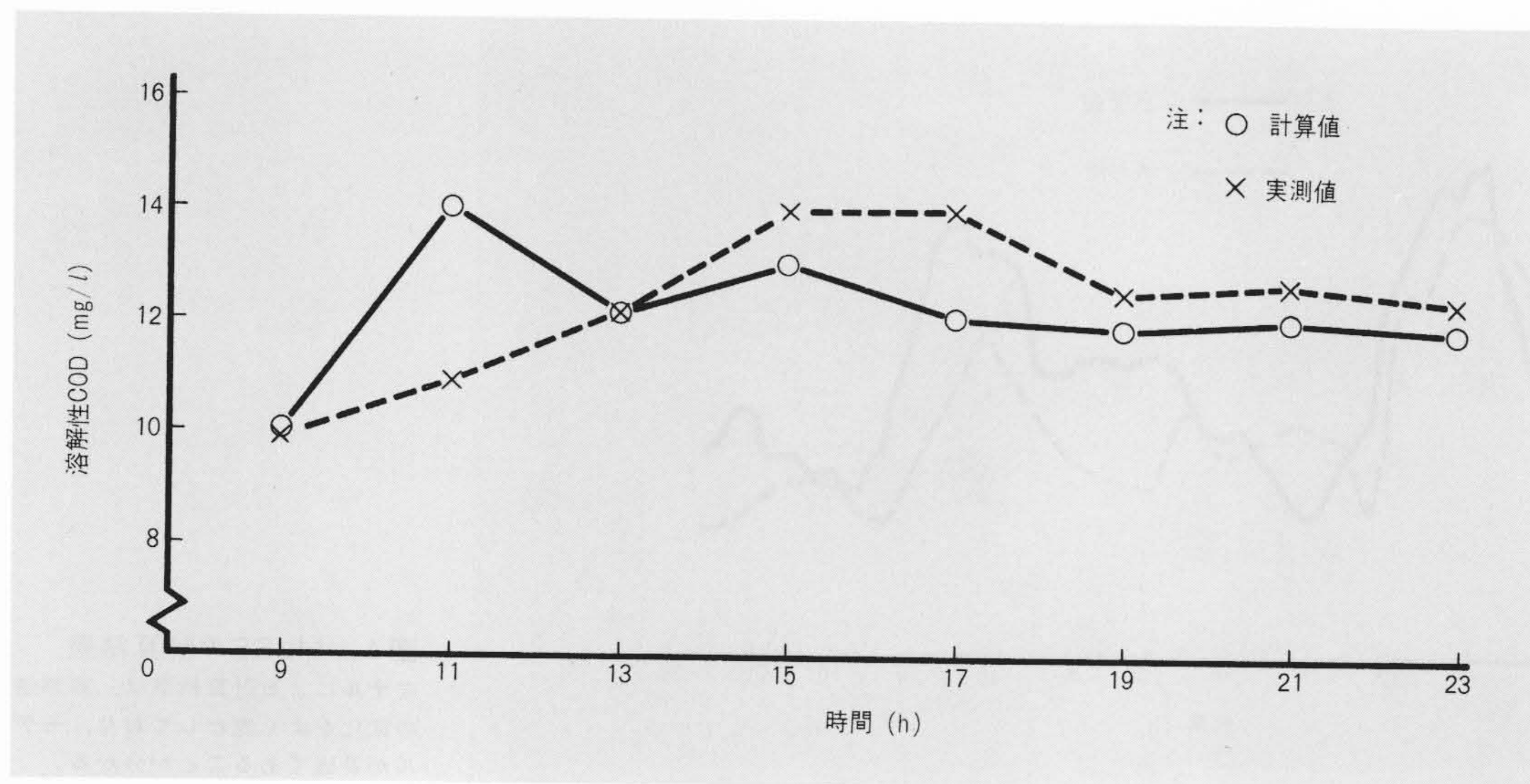


図7 有機物濃度 C_D の計算結果 モデルによる計算値は、有機物濃度の日間変動をよく表わしており、モデルは実用可能であると言える。

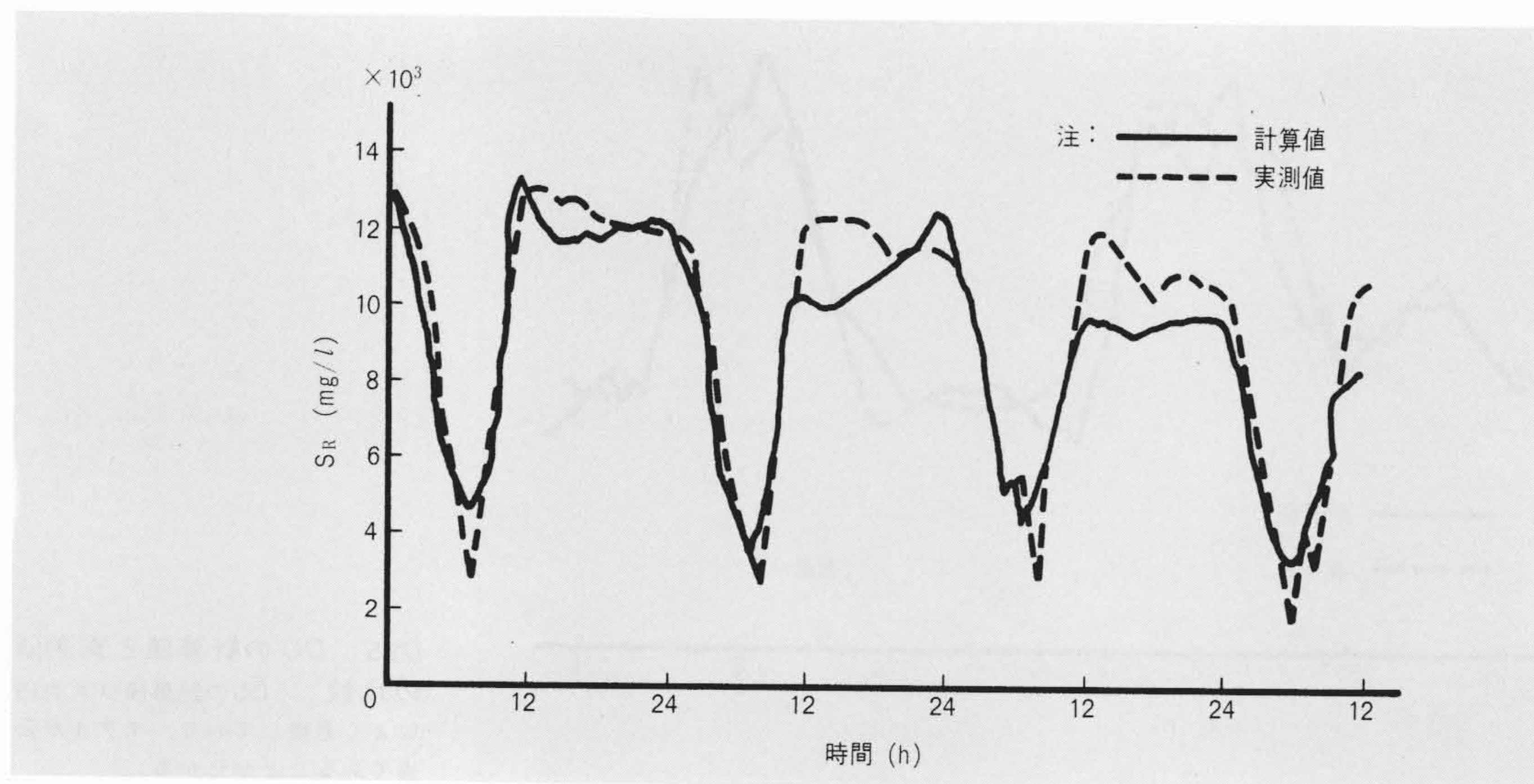


図8 返送汚泥濃度 S_R の計算結果 計算結果は、返送汚泥濃度 S_R の日間変動をよく表わしている。

3.3 沈殿池モデル

(1) 流出汚泥濃度モデル

沈殿池からの流出汚泥(以下、流出SSと略す)の増加は、非溶解性有機物の増加となるため、その予測、制御は重要である。流出SSは沈殿池への負荷が増加すると増える。沈殿池への負荷を表わす指標としては、流量を用いた水面積負荷が用いられていたが、最近Pflanzにより、汚泥量負荷と流出SSに強い相関があることが指摘されている。我々は、流出SSの代替指標である透視度 T_R と汚泥量負荷 U_S の関係を検討した結果、 U_S を平滑化することにより、 T_R の時間変動を表わす表1の実用的モデルを導くことができた⁴⁾。

(2) 返送汚泥濃度モデル

返送汚泥濃度(S_R)のモデルとして、汚泥の濃縮を偏微分方程式で表わしたモデルがあるが⁵⁾、オン・ライン用としては複雑すぎるきらいがある。我々は S_R が沈殿池への流量汚泥量により強く影響されること、また S_R の変化に時間遅れがあることを考慮した表1に示すような簡単なモデルを導いた。モデルによる計算結果は、図8に示すように実測値とよく一致している。

(3) 汚泥濃度分布モデル

沈殿池内の堆積汚泥量、濃度分布はプロセス管理上重要で

ある。沈殿池内の水の流れを押出し流れと仮定し、それに汚泥の沈降、出口壁での汚泥の反転を考慮したモデルを導き計算した結果、実際に近い濃度分布が得られた。

以上のモデルをまとめて表1に示す。

4 汚泥量制御システム

4.1 F/M制御

単位当たりの活性汚泥に対する時間当たりの基質負荷(以下、F/Mと略す)量を表わすF/M値は、汚泥の沈降性と関係があることが指摘されている。特に、F/M値が高くなった場合、バルキングを生じやすいことが指摘されている。F/M値は、流入有機物濃度、流量により左右されるが、このうち負荷として重要な有機物濃度変化に対応してMLSSを変化させる図9のようなF/M制御が考えられる⁶⁾。

図9に示すシステムでは、流入有機物濃度の検出値及びF/M目標値からMLSSの目標値を計算し、MLSS制御系に出力する。MLSS制御系では、返送汚泥量 Q_R を調節しMLSSの追値制御を行なう。

このF/M制御を実施する際には、流入有機物の測定が難しいなどの問題がある。しかし、現在測定技術が進歩していることや、図10に示すように、ばっ気槽での炭酸ガスの発生速

表1 水質モデル 実プロセス・データを用いて、簡単かつ精度の良い実用的なモデルを導くことができた。

モデル名	モデル導出手順	数式モデル
ばっ気槽	1.理論モデル $\frac{\partial S}{\partial t} = -v \frac{\partial S}{\partial x} + P$ $x=0: S = \frac{S_R Q_R + S_0 Q_0}{Q_0 + Q_R}$ 2.ばっ気槽内の増殖量を一定と仮定する。 3.特性曲線法を用いて上式を解く。	$\bar{S}_T(t) = S_H(t - T_L) + a$ $\bar{S}_H(t) = (1 - \alpha_1) \bar{S}_H(t - \Delta t)$ $+ \alpha_1 \left(\frac{S_R Q_R + S_0 Q_0}{Q_0 + Q_R} \right)$ H : ばっ気槽頭部 T : ばっ気槽出口
	1.影響要因として、 Q, Q_A を考慮する。 2.理論モデルから、推定母数関数を定め、回帰分析する $\frac{\partial DO}{\partial t} = -v \frac{\partial DO}{\partial x} + K_L a \times (DO^s - DO) - \gamma r$	$\widehat{DO} = f(Q(t - \Delta t), Q(t - 2\Delta t), \dots, Q(t - n\Delta t), Q_A(t), \dots, Q_A(t - n\Delta t))$ f : 回帰分析により決定される関数
最終沈殿池	1.単位汚泥量当たりの初期吸収量は、有機物が多いほど大きくなる。 2.ばっ気槽内の流動特性は押し出し流れとし、特性曲線法により解く。	槽頭部 $\frac{d\bar{C}_{DH}}{ds} = f_2(\bar{C}_{DH})$ 槽出口 $\bar{C}_{DT}(t) = \bar{C}_{DH}(t - T_L)$
	1.沈殿池内の汚泥収支式を基本式とする。 2.沈殿池への流入汚泥量に対する S_R の応答遅れを平滑式で表わす。	$\bar{S}_R(t) = (1 - \alpha_2) \bar{S}_R(t - \Delta t)$ $+ \alpha_2 \left\{ \frac{S(t)Q(t)}{Q_R(t) + Q_W(t)} \right\}$
	1.透視度への影響要因として汚泥量 U_S を考慮する。 2. U_S に対する T_R の応答遅れを U_S の平滑式で表わす。	$\bar{U}_S(t) = (1 - \alpha_3) \bar{U}_S(t - \Delta t)$ $+ \alpha_3 (S(t)Q(t)/A_S)$ $\bar{T}_R(t) = f_4(U_S, \theta)$

注：記号説明

$\alpha_1 \sim \alpha_3$ = 平滑係数	Q_W = 引抜汚泥量	T_L = ばっ気槽滞留時間
θ = 水温	Q_A = ばっ気風量	A_S = 沈殿池表面積
S_R = 返送汚泥濃度	Q = 流量	a = 増殖量
Q_R = 返送汚泥量	Δt = サンプルング時間	P = 増殖速度

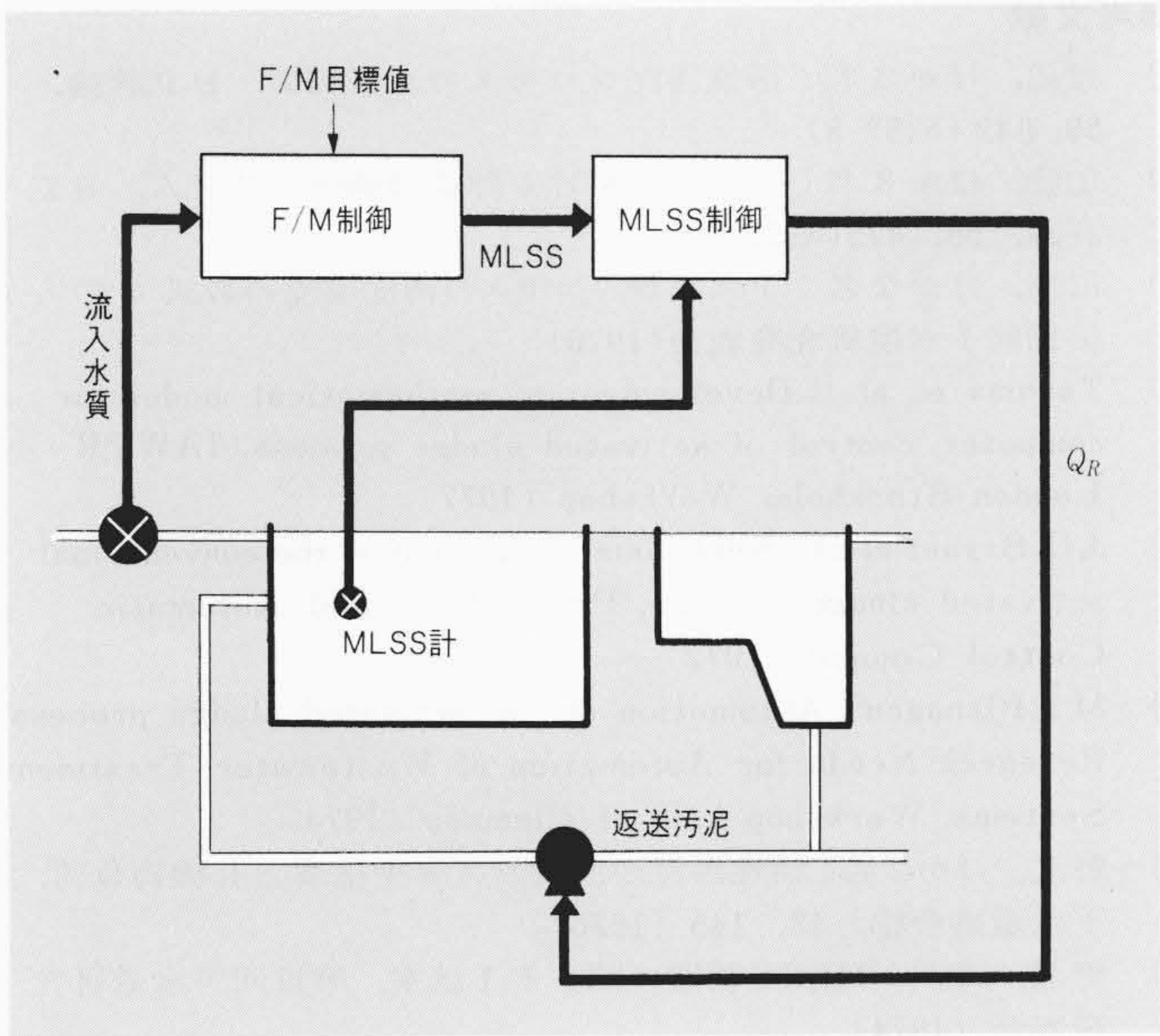


図9 基質負荷(F/M)制御のブロック線図 F/M制御により、過大負荷による汚泥の沈降性の悪化を防止できる。

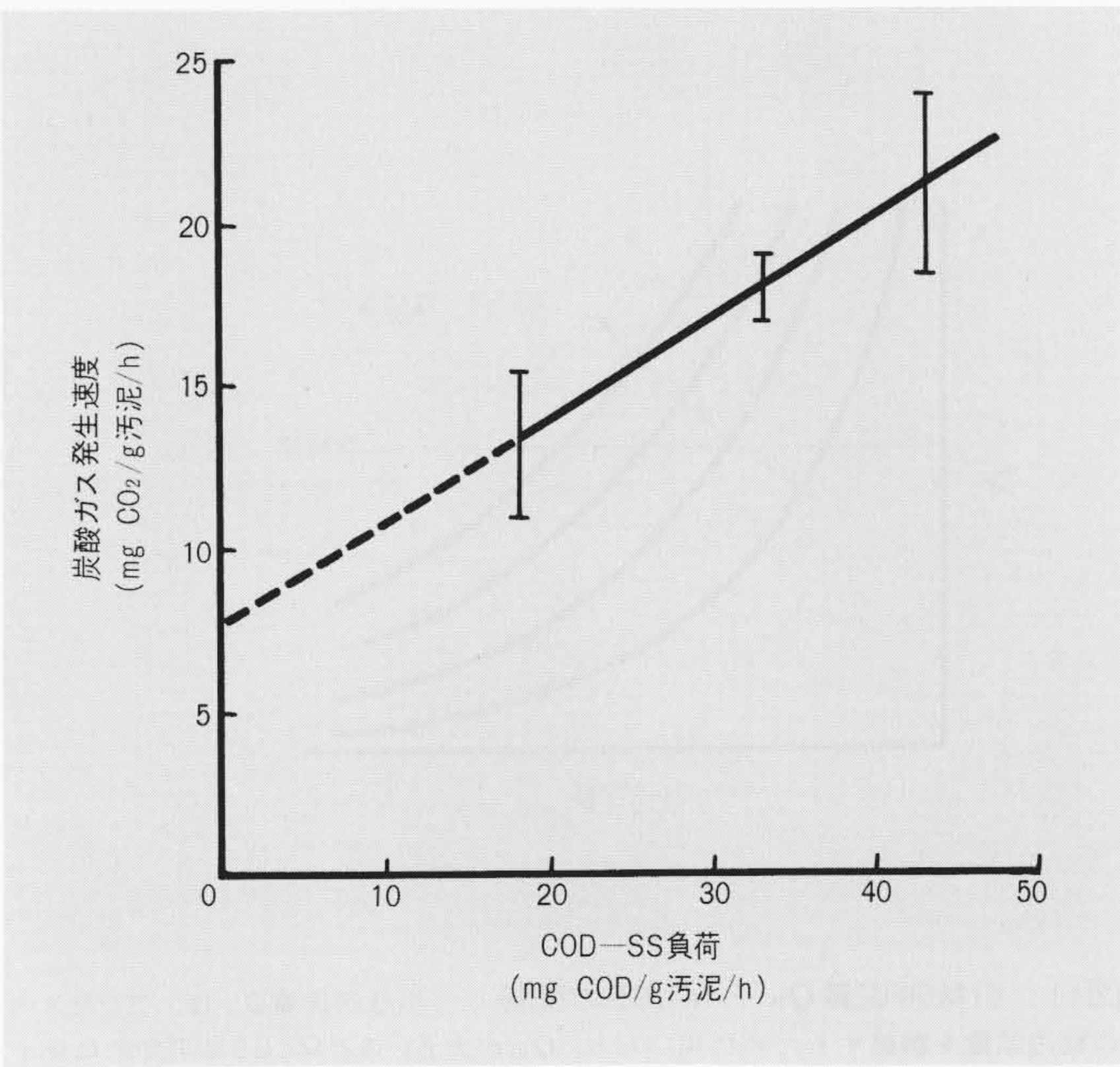


図10 F/M値と炭酸ガス発生速度の関係 F/M値と炭酸ガス発生速度の間には強い相関関係があり、F/M値の代替指標として炭酸ガス発生速度を用いることができる。

度とF/M値の間に強い相関関係が見いだされており⁷⁾、そのような代替指標も利用できることなどから問題は解決できると思われる。また、有機物が増加するのは流量増加時である場合が多く、このため汚泥量の一時的な不足が心配されるが、それに対しては汚泥貯留槽の設置や、ばっ気槽内の汚泥貯留方式などが提案されている⁸⁾。

4.2 汚泥量制御システム

MLSS制御やF/M制御のように応答が早い制御には、返送汚泥量 Q_R が用いられる。それに対して、引抜汚泥量 Q_W はプロセス内の総汚泥量を調節する機能を持つ。プロセス内の総汚泥量を適正に保つことは、プロセスの安定化のため必要であり、 Q_W の操作は処理場でも重視されている。

Q_W を用いた制御としては、これまで汚泥令制御やプロセス内の汚泥の滞留時間を示す汚泥滞留時間(SRT)制御が行われてきた。これらの制御は一面では、プロセスの総汚泥量制御を行なっていると言える。例えば、プロセスの汚泥量が多くなると、汚泥令及びSRTが高くなり、これを防ぐため Q_W が増加される。これは、総汚泥量を元の値にもどすことになる。

このような制御のほか、数式モデルにより汚泥量の管理を行なうことも試みられつつある²⁾。プロセス・モデルを静的状態について解くと、 Q_W とMLSSの関係は図11に示すようになる。同図から、汚泥増加量(流入汚泥量+増殖量)が変化すると、総汚泥量を一定に保つためには、 Q_W の調節が必要なのが分かる。既に述べたように汚泥濃度モデルも確立されつつあり、今後、図12に示すような汚泥量管理制御システムが実用化されると思われる。

5 水質オペレーション・ガイド・システム

5.1 システムの概要

処理場での究極の目的は、最高の処理水質を低コストで得ることであり、このためにはDO、MLSS、汚泥量の最適値を数式モデルを用いて探索し、制御系に設定する必要がある。しかし、そのような最適化制御は、数式モデルの精度、検出端から見て一挙にオンライン化する前に図13に示すように、水

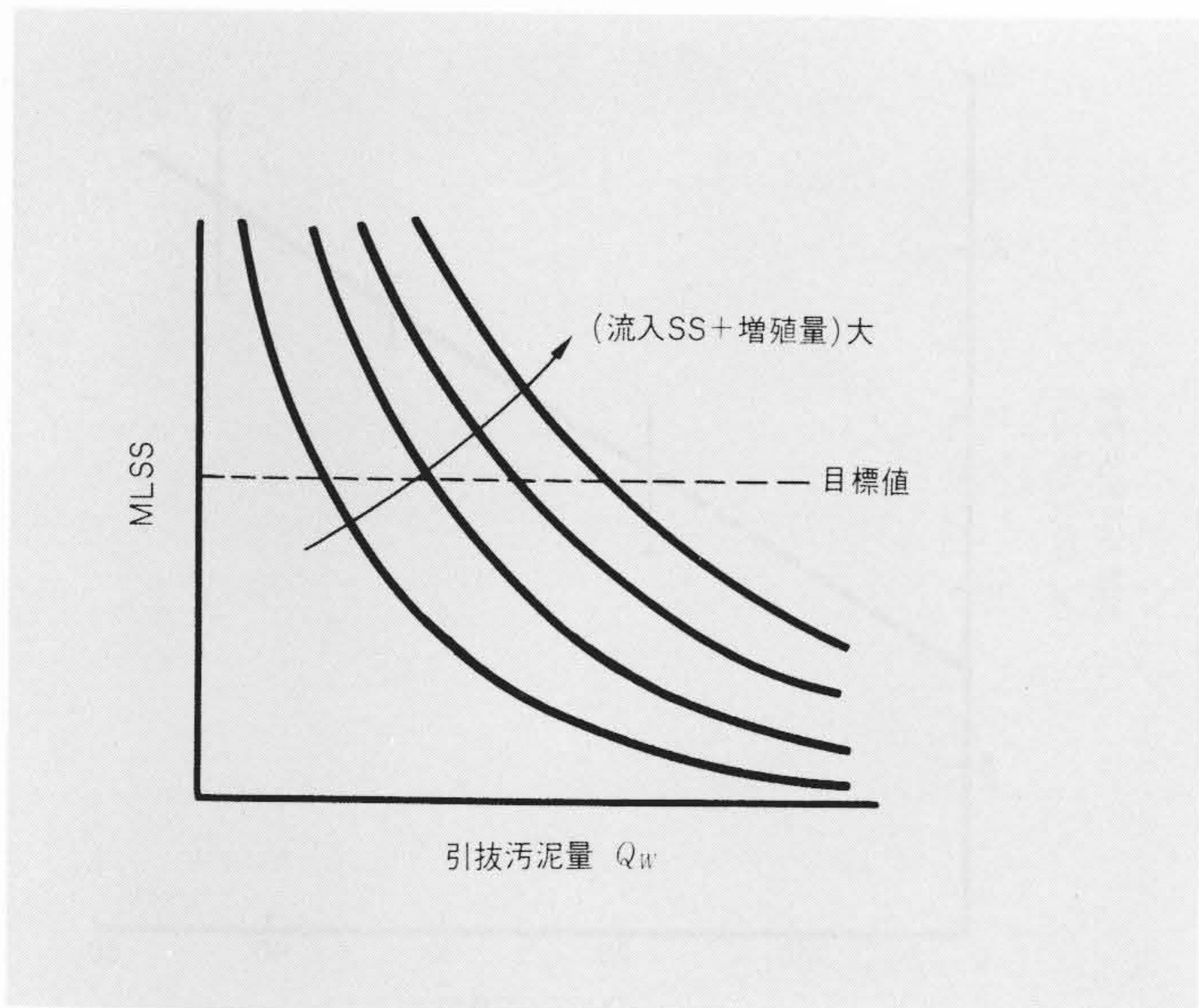


図11 引抜汚泥量 Q_w とMLSSの関係 引抜汚泥量 Q_w は、プロセス内の総汚泥量を調節するために用いられ、 Q_w が大きいほどMLSSは平均的に低くなる。

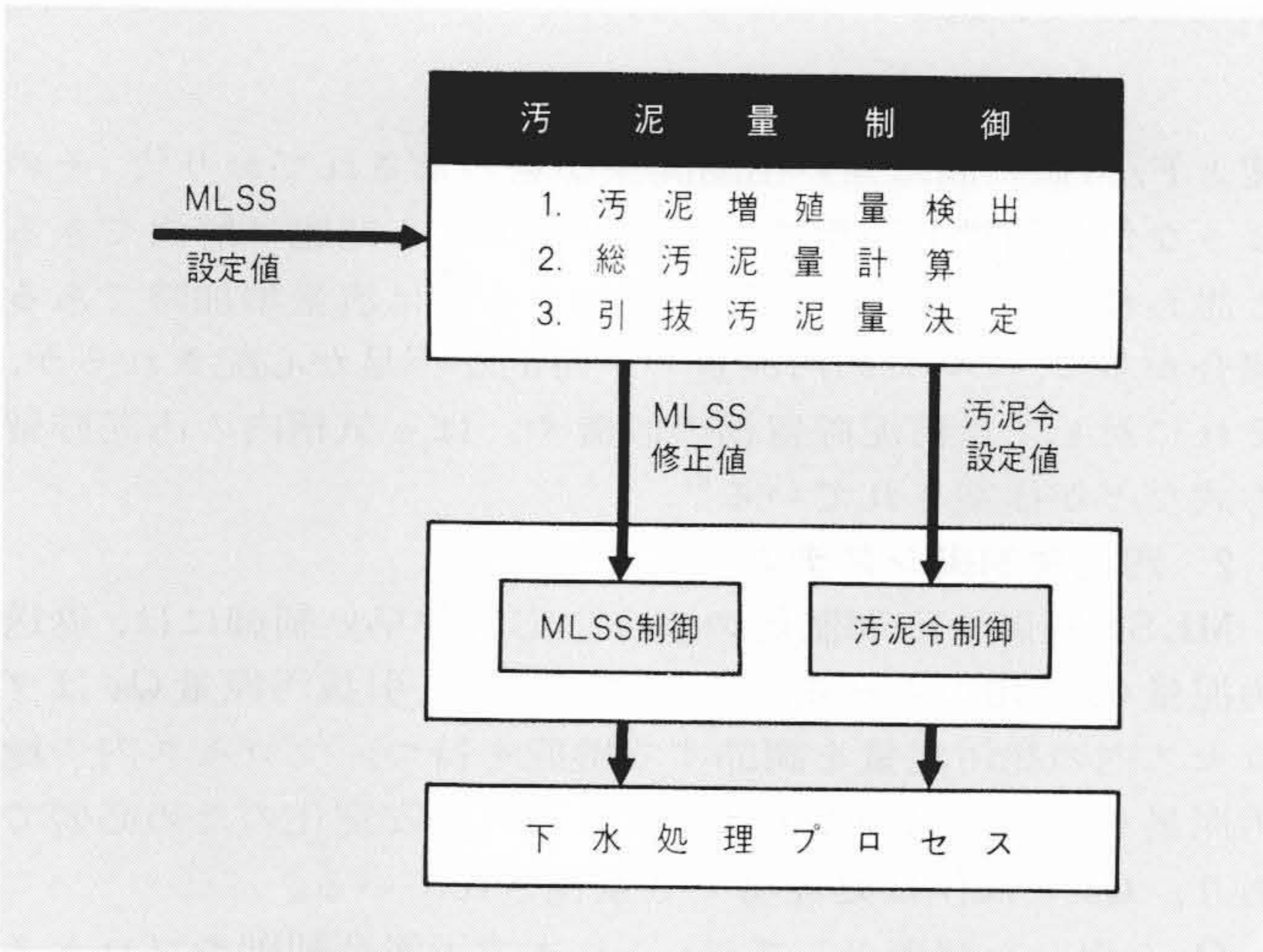


図12 汚泥量制御システム 汚泥量制御は、プロセス内の総汚泥量を考慮して引抜量を調節し、プロセスの長期安定化を図る。

質のオン・ライン予測値やDO、MLSSの設定値をオペレータに提供し、オペレータの勘と体験を加味し判断を仰いで実際操作を行なうとともに、データを蓄積していくオペレーション・ガイド・システムの段階を積み重ねることが望ましい。

5.2 水質オペレーション・ガイド方式

(1) 水質オン・ライン予測によるオペレーション・ガイド

流量や水質などのプロセス入力に変化した場合、また返送汚泥量や引抜汚泥量を操作した場合、それが将来プロセスにどのように影響するか、数式モデルで予測するのが水質オン・ライン予測である。このような予測を行ない、オペレータに結果を表示することは予測制御を可能にし、大きな応答遅れを持つ下水処理プロセスでは特に有用である。

(2) 水質パラメータ設定値のオペレーション・ガイド方式

MLSS、DOの設定値を、数式モデルを用いて設定する試みはまだあまりないが、Lacroixらの研究は、その数少ない例と言える⁹⁾。Lacroixらは、放流水の溶解性有機物濃度、流出汚泥濃度と汚泥令、返送汚泥量の関係を、実プロセス・デー

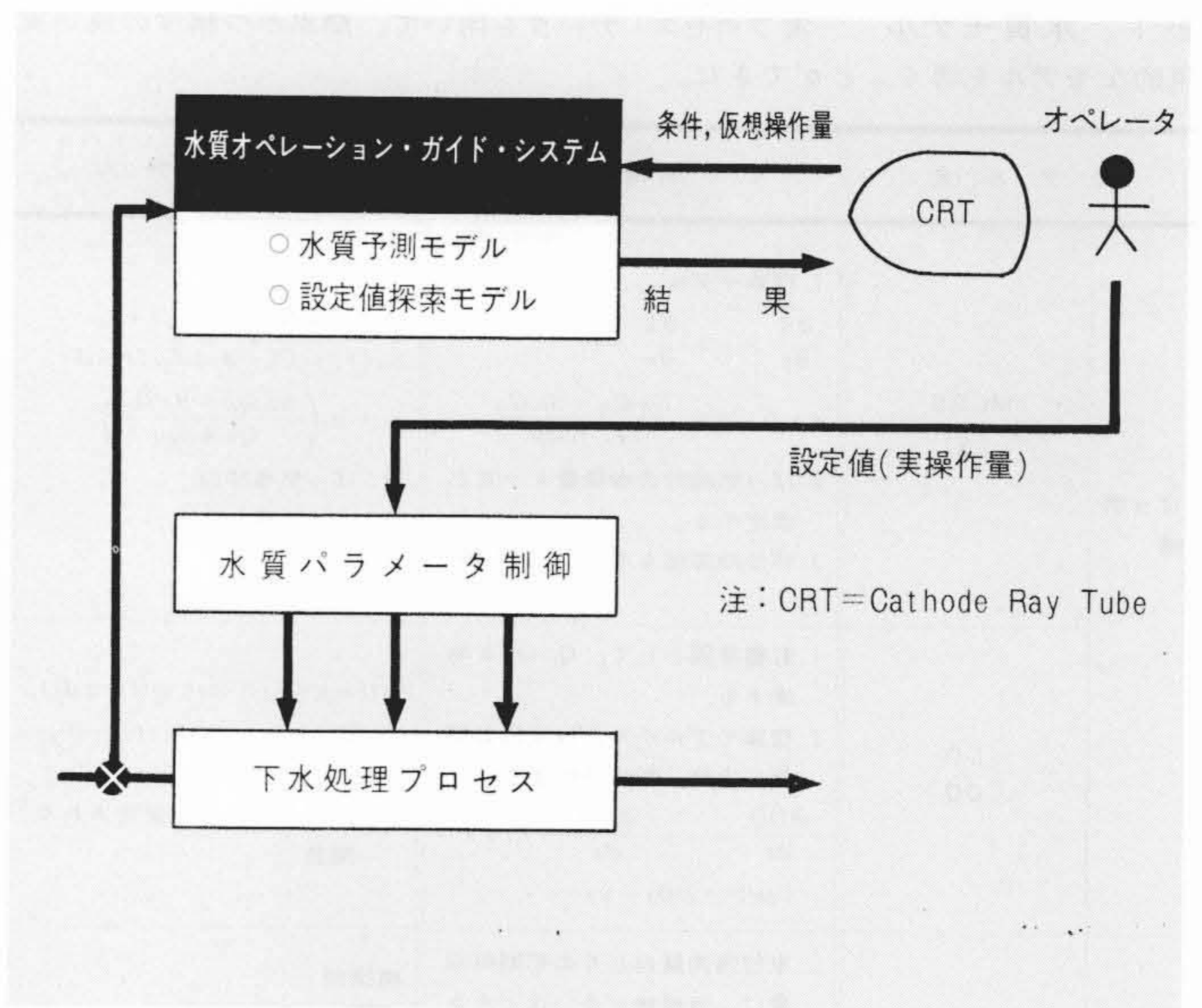


図13 水質オペレーション・ガイド・システム 水質モデルを用いた水質予測などによる運転ガイダンスを表示し、運転をサポートする。

タから回帰分析を用いて定式化し、そのモデルから最高の処理水質を得るための操業条件を探索している。

我々は、これまで開発した放流水質モデルに山登り法を用いて、MLSSの最適値を決定することを試みた結果、熟練運転者の操作量に近い値を得ている。

このような、数式モデルによる操業条件の決定方法の研究はまだ緒についたばかりであるが、今後プロセスの特性解明が進むにつれ、実現性が大きくなっていくものと思われる。

6 結 言

下水処理プロセスの水質制御の今後の課題である総合水質制御システムについて、その構成と制御技術の現状について報告した。総合水質制御システムについては、まだ研究の段階にある制御技術もあるが、総合水質制御の実現に必要なプロセス・モデルについては、その基礎固めができた。今後、総合水質制御システムの実現に努力していきたい。

参考文献

- 1) 渡辺, ほか 3 名: 活性汚泥プロセスの水質制御, 日立評論, 59, 643 (昭52-8)
- 2) 加藤, ほか 3 名: 下水道における計算機制御システム, 日立評論, 58, 475 (昭51-6)
- 3) 田沼, ほか 2 名: 下水処理プロセスの汚泥濃度の数式モデル, 第13回下水道研究発表会(1976)
- 4) Tanuma et al.: Development of mathematical model for computer control of activated sludge process, IAWPR London Stockholm Workshop (1977)
- 5) J.O.Bryant et al.: Real-time simulation of the conventional activated sludge process, Proceeding, Joint Automatic Control Council (1972)
- 6) M.J.Flanagan: Automation of the activated sludge process, Research Needs for Automation of Wastewater Treatment Systems, Workshop held at Clemson (1974)
- 7) 野北, ほか 2 名: 活性汚泥の炭酸ガス発生速度と有機物負荷, 下水道協会誌, 13, 145 (1976)
- 8) 野北, ほか: MLSS制御に関する 1 試案, 第11回下水道研究発表会 (1974)
- 9) P.G.Lacroix: Computer aided activated sludge plant operation, J.WPCF, 44-12 (1972)