

活性汚泥プロセスの水質制御

Dissolved Oxygen Control of Activated Sludge Treatment Process

活性汚泥プロセスの水質制御は、河川水質の保全、省電力などを目的として、下水処理システムの最適運営管理を図るものである。最近におけるオンライン水質計の進歩やプロセス動特性の解明などにより、制御システムの導入が各所で試みられるようになった。

東京都下水道局は三河島処理場の実プロセスに日立製作所のアナログ及びHIDIC 500並びにMINIDIC 30コントローラによるデジタル水質制御システムを設け、その調整を通してプロセスデータの収集、特性の解析、及び水質計器の特性把握を3箇年にわたって行ない、水質制御技術の確立を進めてきた。これにより、水質制御は処理効率及び電力費低減に多大な効果があることが実証され、水質制御システムの実用化を図ることができた。

この論文では、アナログ及びデジタル・コントローラによる溶存酸素制御システムの実績を述べるとともに、水質計のオンライン寿命テストの結果について述べる。

長崎 良三* *Nagasaki Ryôzô*
渡辺 昭二** *Watanabe Shôji*
田沼 正也** *Tanuma Masaya*
小笠原 均*** *Ogasawara Hitoshi*

1 緒言

下水道が公共水域の汚濁防止に果たす役割は大きい。このため、下水道整備事業は国家的施策として推進され、昭和38年以降から総事業費が増大している。第4次下水道整備5箇年計画(初年度・昭和51年度)では7.5兆円に達する公共投資が充当されている。これらの巨費を投じた下水道施設の合理的運用は最重要課題の一つであり、このため電子計算機などの最新の機器の利用が図られるようになった。

東京都下水道局は、三河島処理場の実プロセスにアナログ及びデジタル水質制御装置を設置し、その調整を通してプロセスデータの収集、特性の解析を3年間にわたって進めた結果、活性汚泥法による大規模処理場の実プロセスにおいて水質制御技術の確立することができた。以下、水質制御技術の一翼である溶存酸素制御システムの概要について報告する。

2 下水処理システム

下水処理システムは巨大なシステムへ成長した。一方、下水処理システム内で起こっている現象は、流動、機械的分離、微生物反応、伝熱、物理化学反応など複雑広範囲にわたっている。また下水処理システムは、ポンプ、ブロワなどの回転機、配管、弁などの機械要素、各種計器類、制御系など多種、多様の構成要素を含むものである。特に図1に示す活性汚泥プロセスは、従来から下水高級処理の中心となっているものであるが微生物反応に依存し、また、返送汚泥系のリサイクルをもつ複雑なシステムであるため、ビヘビアの解明が困難であり、オンライン使用可能の水質検出端が得られなかったことなどが制御システムの進歩を阻害してきた。

東京都下水道局と日立製作所は、これに対し最終の放流水質を左右する微生物の最適活動条件を規定する周囲条件を整えることが実プロセスにおいて最も有効であることに着目し、また溶存酸素濃度計と混合液浮遊物濃度計は瞬時連続測定可能であることから、エアレーションタンクの溶存酸素濃度〔Dissolved Oxygen(以下、DOと略す)〕、活性汚泥濃度〔Mixed Liquor Suspended Solids(以下、MLSSと略す)〕、及び汚泥令(Sludge Age)を目標値として送風量、返送汚

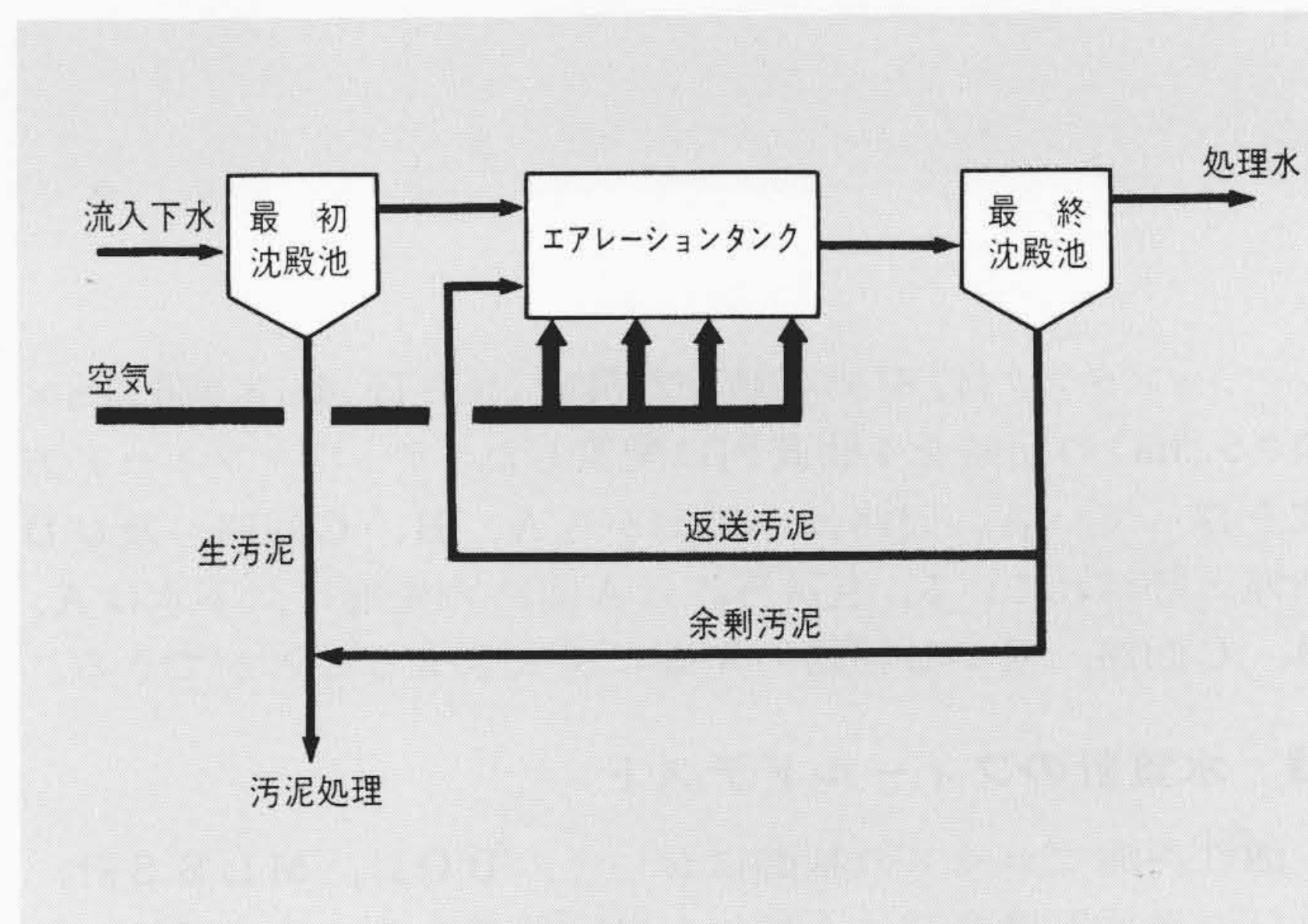


図1 代表的な活性汚泥プロセスの系統図 このプロセスの主要施設は、エアレーションタンクと最終沈殿池である。

泥量、及び引抜汚泥量を制御するシステムを採用することとした。

3 三河島処理場の概要

三河島処理場は主として台東区と荒川区の下水を、日量52万t処理する代表的な大規模処理場である。この処理場は、浅草系、尾久系及び藍染系の3幹線が流入し、それぞれの幹線に対して独立した処理施設が設けられている。

浅草系処理施設は、最初沈殿池5池と容量25.2km³/hの多段ターボブロワ5台を共通とし、下水0.45Mm³/dの処理を南系と北系とではほぼ等量ずつ分担している。

浅草系南プラントは、エアレーションタンク4槽と最終沈殿池8池から成り立っている。同プラントの平面図を図2に示す。最初沈殿池と最終沈殿池はともに連続水平流式長方形型であるが、前者はリンクベルトによって、後者は走行ゲータサイホンによって汚泥引抜きを行なっている。1槽のエア

* 東京都下水道局三河島処理場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所大みか工場

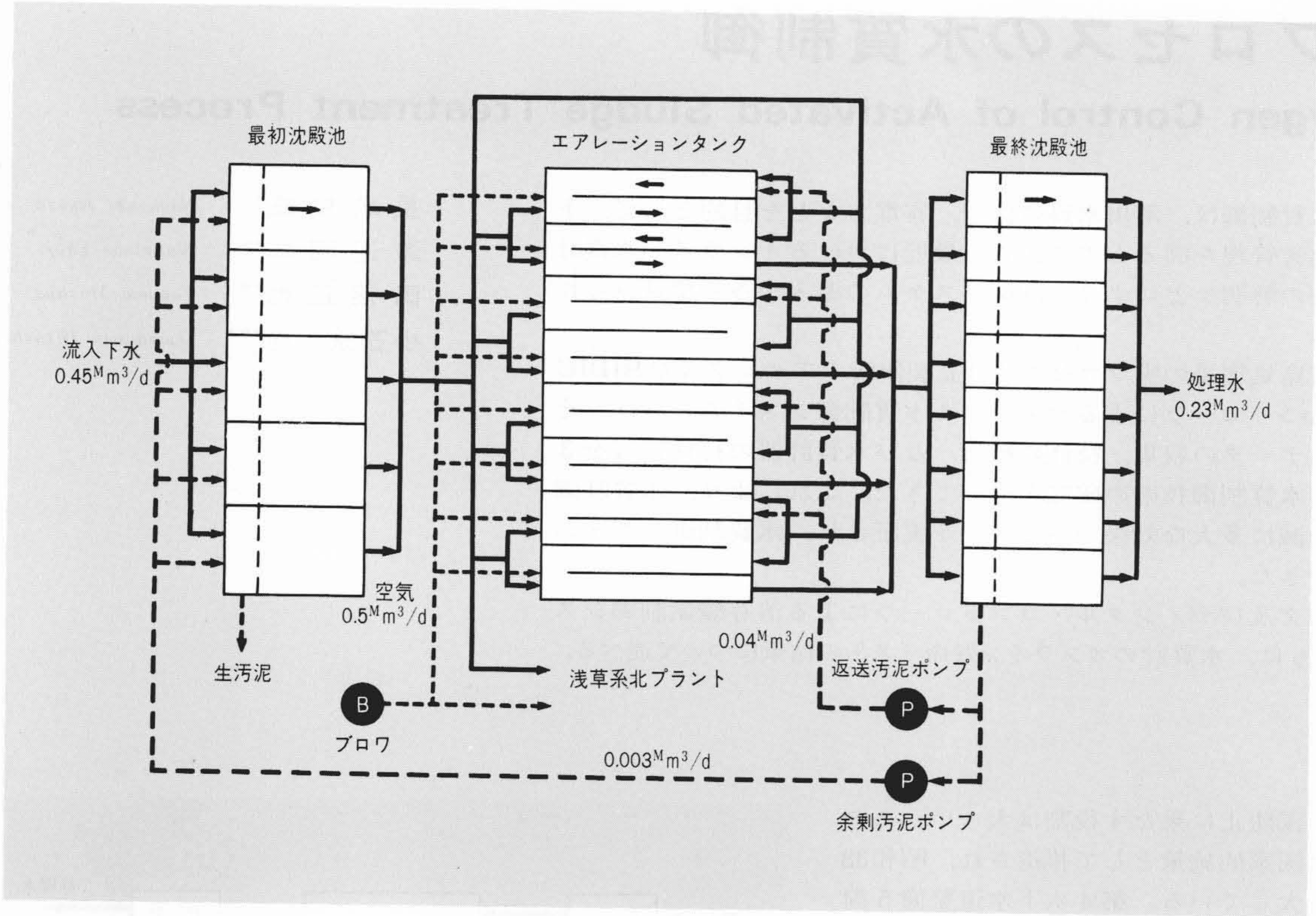


図2 三河島処理場・浅草系南プラントのフローシート 南プラントは、ブロウと最初沈殿池5池を北プラントと共通とし、エアレーションタンク4槽、最終沈殿池8池とで構成される。

レーションタンクは、有効容積が2.5km³(長さ75.4m×幅6.3m×深さ5.3m)の回路を4個直列に配置したステップ・フィード方式を採っている。回路は上流側からA、B、C回路、及びD回路と呼ばれている。返送汚泥はA回路の先端に、下水はA、B、C回路、及びD回路の先端に流入させることができる。

4 水質計のフィールドテスト

活性汚泥プロセスの制御において、DO計、MLSS計、及び返送汚泥濃度計は不可欠な計測器である。ここでは、これら水質計のフィールドテストに基づいて使用上の留意事項を述べる。

4.1 DO計

非隔膜電極式DO計と隔膜電極式DO計についてテストを行なった。両者の指示値は基準DO計の指示値と直線的な関係を持っていた。

前者は、感度が高く時定数は数秒であるため、これを制御システムに組み込む場合には出力のふらつきを円滑化する工

夫が求められた。また、電極を研磨するやすり石の交換を2ないし3箇月ごとに行なう必要があった。

後者は、測定用の採水ラインを設ける必要があり設備費がかかるが、感度が適度に低いため出力のふらつきはなく、したがって、制御システムに組み入れる際に特別な配慮は不要であった。また、隔膜の交換は6箇月に1回で十分であった。

4.2 MLSS計

散乱反射光測定方式によるMLSS計についてフィールドテストを行なった。初期には、検出部の絶縁性低下による測定値異常が発生したが、検出部を新品と交換することによってこの問題は解決した。この測定器を制御システムに組み込んだ場合には、3箇月に1回程度の頻度で検量を行なう必要があった。これは、季節ごとに活性汚泥の性状が変化するためである。

4.3 汚泥濃度計

表1に示した超音波減衰式汚泥濃度計についてフィールドテストを行なった。

テストの結果、汚泥濃度計は信頼性の高い指示値を与えることが分かった。しかし、汚泥性状によって指示値の変化が生ずるので、季節ごとに検量線を作り直す必要があった。なお、検出端を取り付ける際には、気泡による外乱を受けない位置を慎重に選ばなければならない。

5 非制御時のプロセス・データの特徴

制御実験を行なう前に対象プロセスの標準的な挙動を調べた。

5.1 流入水量と水質の変動

エアレーションタンク入口における流入水量と水質の日間変動の一例を図3に示す。この図は住宅地域における特有な変動パターンを表わしている。

5.2 プロセス状態変数の変動

流入水量の日間変動に対応して、プロセス状態変数は変動する。図4は、返送汚泥量と送風量を一定とした場合のエア

表1 水質計器の保守・点検 フィールドテストの結果、これらの水質計器はオンラインで使用できることが分かった。

水質計器	測定方式	保 守・点 検
DO計	隔膜電極式	電解液、隔膜の交換は6箇月に1回。 配管系統の詰まりに注意が必要。
	非隔膜電極式	電極研磨用やすりの交換は2～3箇月に1回。 電極の交換は1～3年に1回。
MLSS計	散乱反射光式	季節ごとに検量線の作成を要する。 センサ部での汚泥付着はない。
返送汚泥計	超音波減衰式	季節ごとに検量線の作成を要する。 センサ部の洗浄は年2回程度。

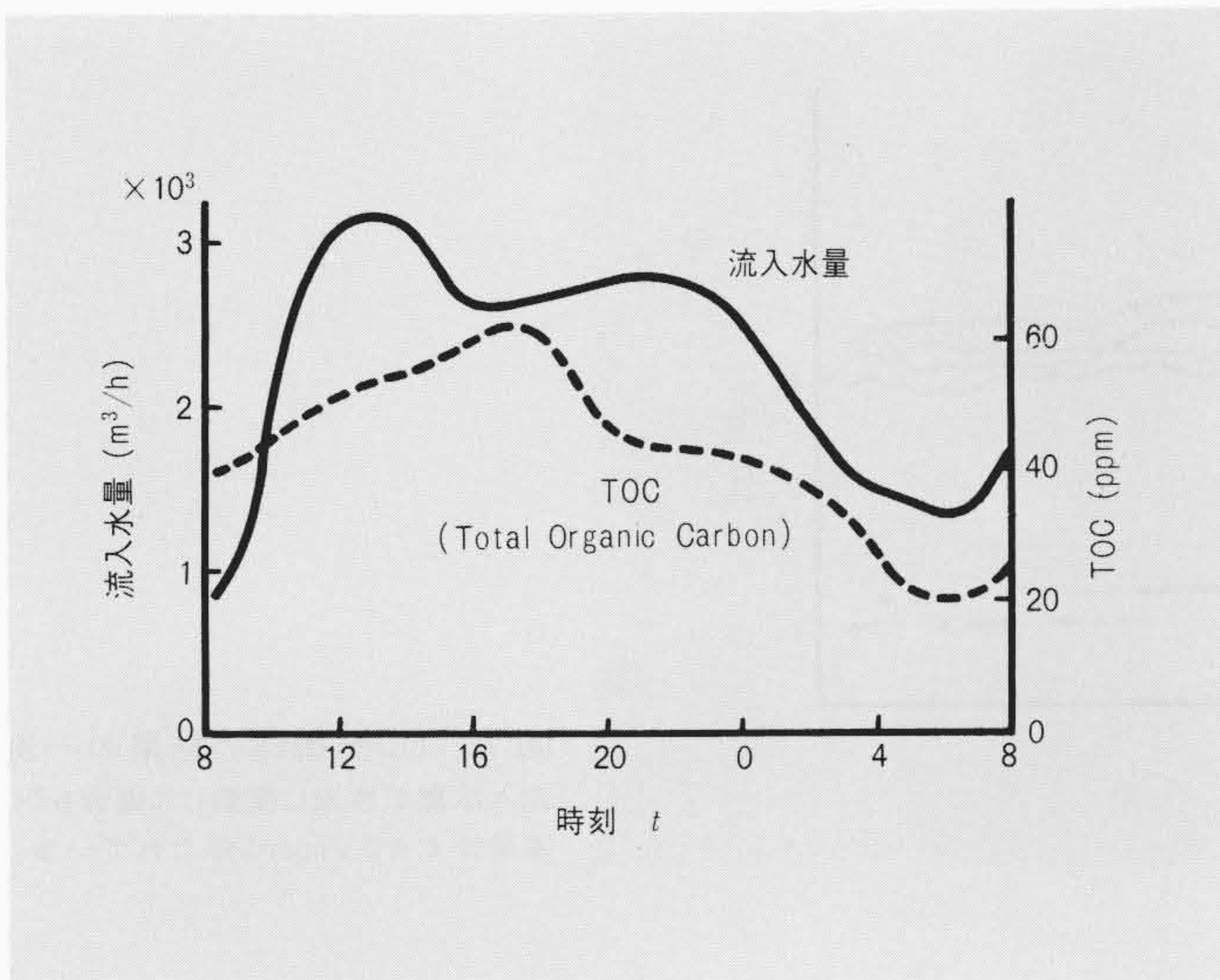


図3 流入水量と水質の日間変動 流量及び水質は、約3倍の変動幅をもっている。これがプロセスに大きな外乱として作用する。

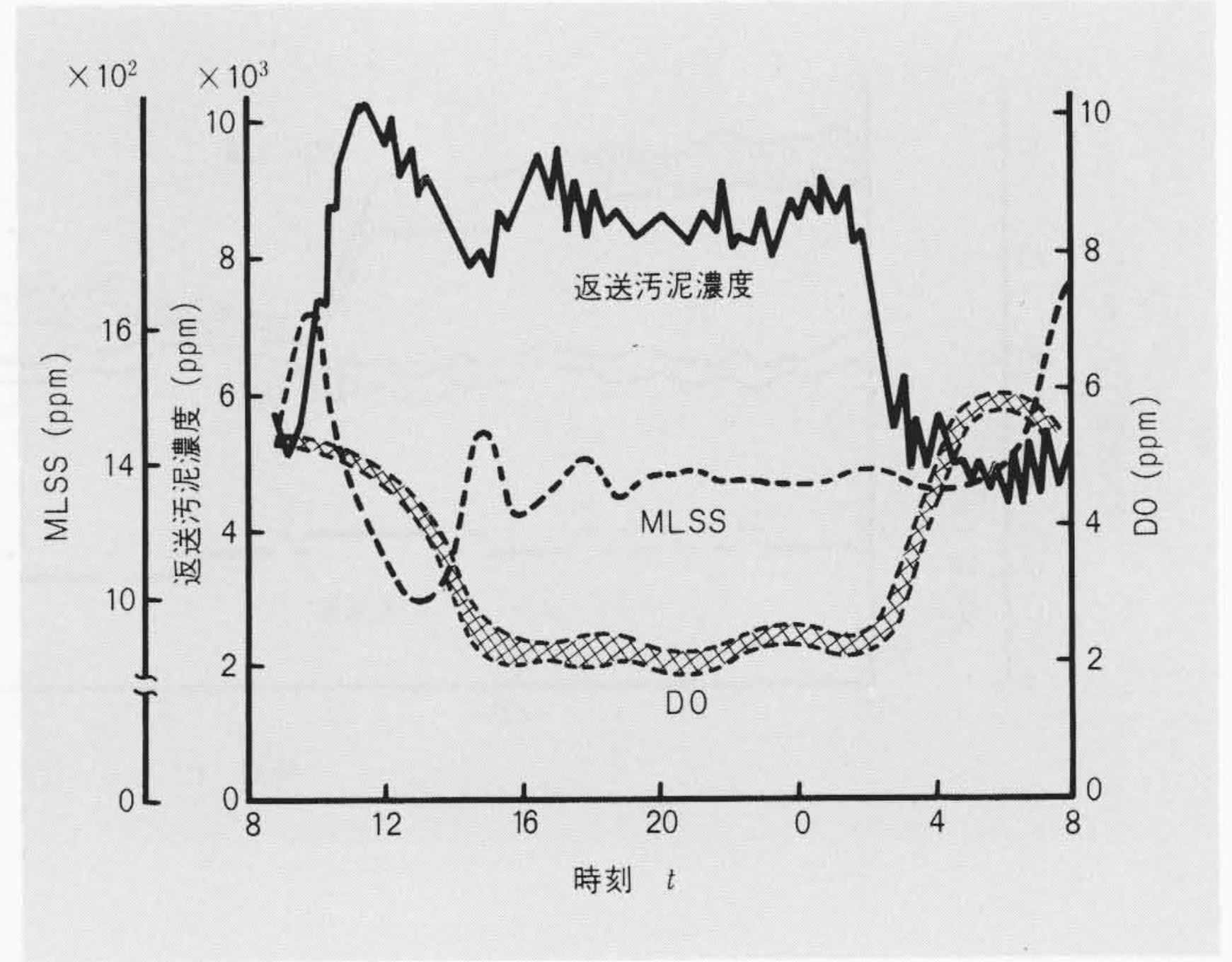


図4 プロセス状態量の日間変動 各種濃度は、流入水量の変動に応じた挙動を示している。

レーシオンタンクDO、MLSS、及び最終沈殿池からの返送汚泥濃度の日間変動である。

図3と図4を比較して、次のような傾向を知ることができよう。

- (1) DOは30分程度の遅れを伴って、水量変化に対して逆比例的に追従している。
- (2) MLSSは数時間ないし10時間の遅れを伴って、水量変化に対して逆比例的に追従している。
- (3) 返送汚泥濃度は1時間ないし3時間の遅れを伴って、水量変化に比例的に追従している。

これらの傾向は、輸送と物質移動を考慮した数式モデルによって定量的に説明できることが分かった。

6 アナログ制御システム

図5にアナログ・フィードバック制御システムを示す。こ

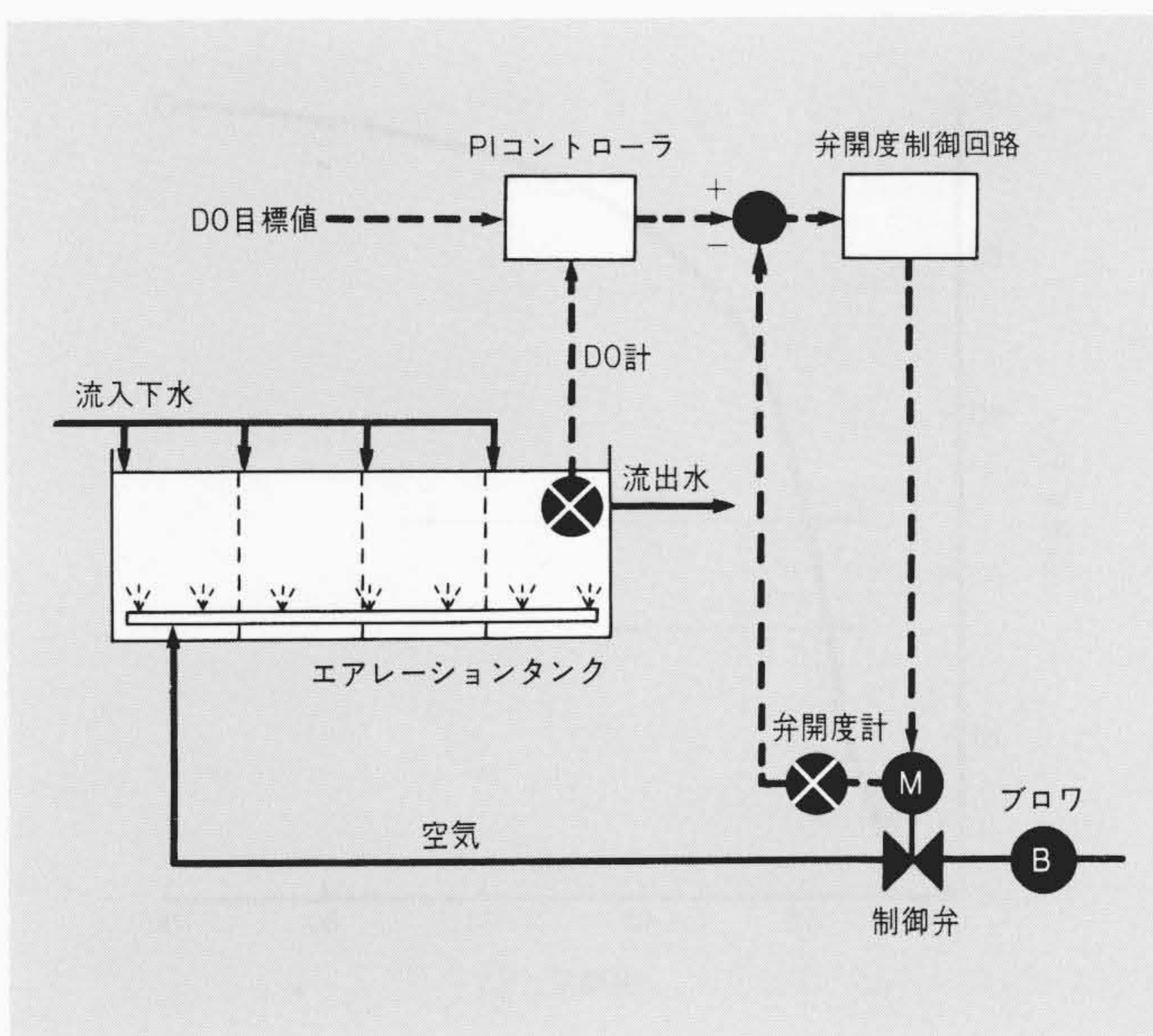


図5 アナログDO制御システムのフローダイアグラム エアレーションタンク出口部のDO濃度が一定となるように送風量を制御するものである。

のシステムは手動設定器、PI調節計、加減演算器、アナログメモリ、乗除演算器などの工業計器を中心として、シーケンス回路より構成されている。DO制御は、エアレーションタンクのDO計測定信号とDO目標値との偏差に応じてPI動作を行なわせ、空気弁開度を調節する方式を採っている。

DO計の設置位置は、DO変動が比較的穏やかであり、かつ、エアレーションタンクの最終的なDOを監視する目的でエアレーションタンク出口部とした。また、空気制御弁は、当初はNo.1エアレーションタンクの入口空気管に、第2次ではNo.4エアレーションタンク側空気主管に、第3次では中央の空気主管に、それぞれ設けた(図6)。

また、空気制御弁の開度と送風量の関係が非線形特性であるために、制御ゲインをあまり大きくとれないという問題点がある。これは、後述するように制御精度に対して大きな影響を及ぼすものであった。

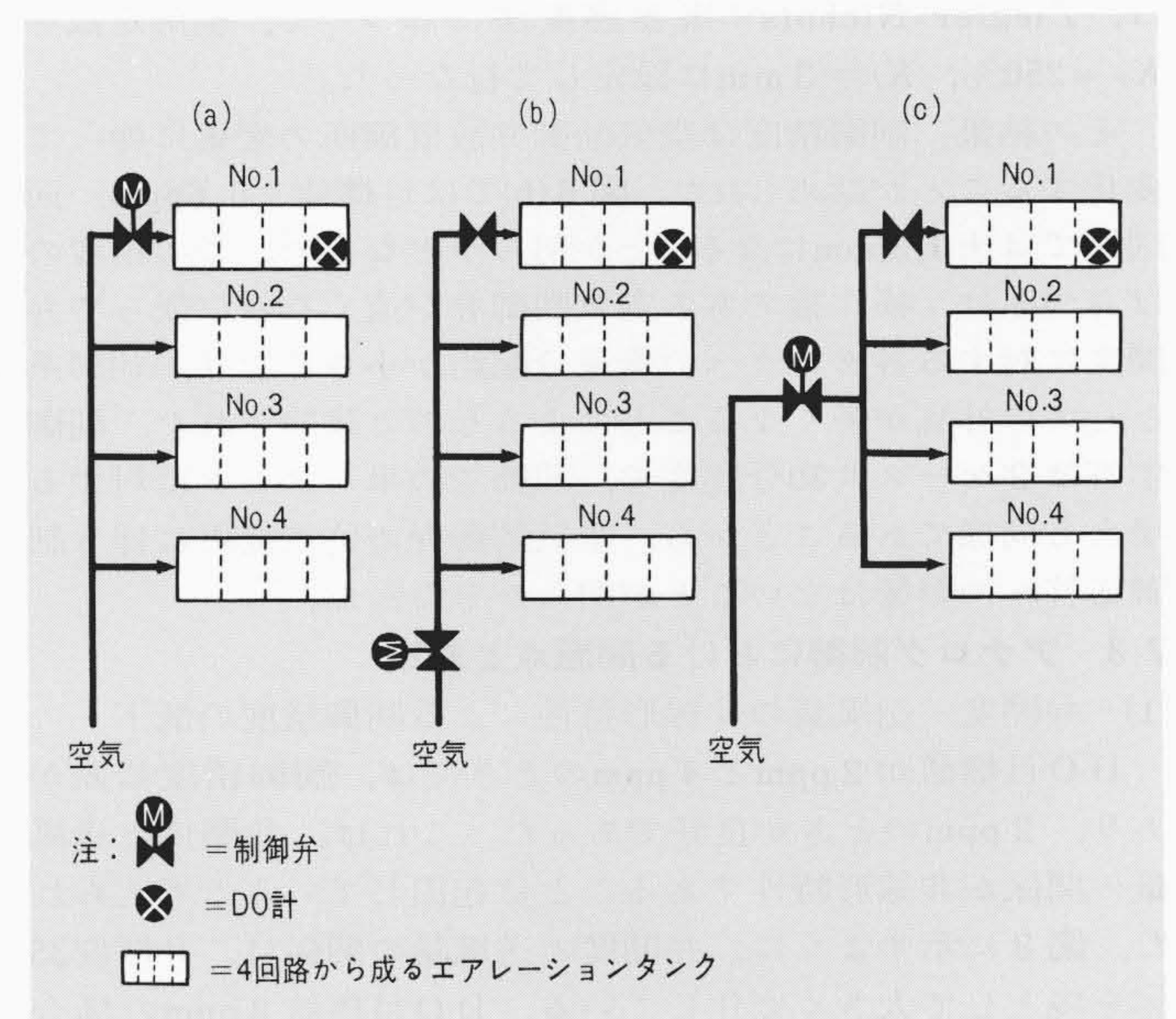


図6 制御実験における制御弁の位置 送風量制御弁の位置変更に伴い、制御精度が変化した。

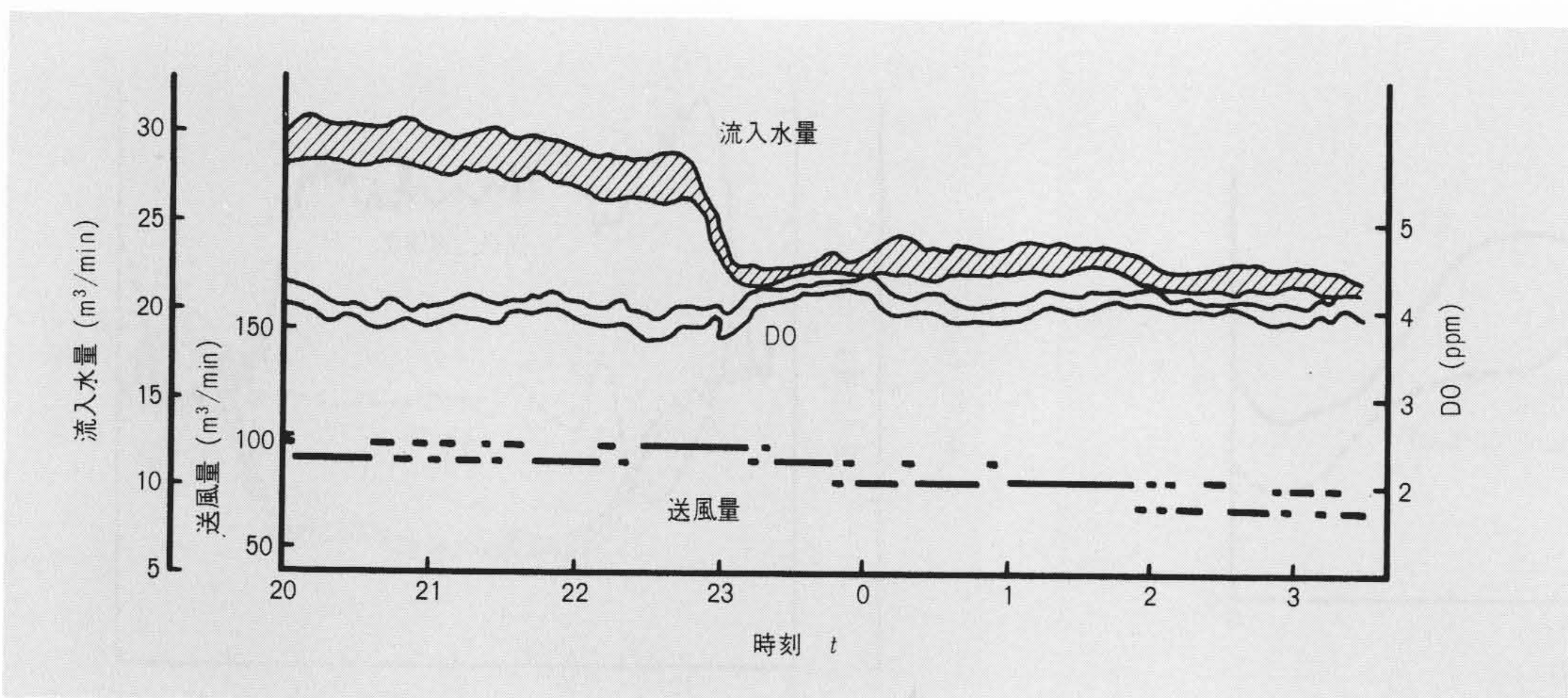


図7 DO制御時の結果の一例
流入水量が急激に変動した場合もDO濃度は $4 \pm 0.2\text{ppm}$ に保たれている。

7 アナログ制御システムによるDO制御

7.1 単一エアレーションタンクのDO制御

No.1 エアレーションタンクだけを制御対象としたDO制御実験が約1箇年にわたって行なわれた。この期間には、コントローラの比例ゲイン K_P と積分定数 K_I に対する制御精度を確認するため、 K_P と K_I の値を種々変更して実験が繰り返された。

その結果、 $K_P=250\%$ 、 $K_I=3\text{min}$ の設定値において、最も良好な制御精度を示した(図7)。この設定値は、制御実験前にあらかじめ行なったアナログ・シミュレーションの結果¹⁾と一致するものであった。図7に示した制御結果の一例は、DO目標値を4ppmとしたときのもので、流入水量変動が100%/2hに対して制御精度は $\pm 0.2\text{ppm}$ と非常に小さい値が得られた。制御応答は30分程度であり、流入水量の急変に対しても、ほぼ安定した制御応答が得られた。

7.2 全エアレーションタンクのDO制御

No.1 からNo.4 までの全エアレーションタンクに共通する空気主管の弁開度を制御する実験〔図6(b), (c)]はほぼ10箇月にわたって行なわれた。これらの制御実験において、DO計はNo.1 エアレーションタンクの出口部にだけ設置されており、この出力値が全タンクの代表値であると仮定した。実験は、Ziegler-Nicholsの限界感度法に基づいて、制御定数を $K_P=250\%$ 、 $K_I=3\text{min}$ に設定して行なった。

その結果、制御精度は空気制御弁設置箇所の変更に伴って変化することが認められた。図6(b)では目標値 $\pm 0.6\text{ppm}$ 、同図(c)では $\pm 0.3\text{ppm}$ になることが明らかとなった。この精度のばらつきは、操作端である空気制御弁が遠くなるに従って弁開度に対する各タンクへの風量分配比が小さくなり、制御系としての外乱が多くなることによるものと推論された。制御応答は2ケース共30分程度で、前節での単一タンクに対する場合も同様であることから、空気制御弁の位置変更に伴う制御応答への影響はないことが明らかとなった。

7.3 アナログ制御における問題点と対策

(1) 弁開度—送風量の非線形特性による制御精度の低下

DO目標値が2ppmと4ppmのときでは、制御精度に差があり、2ppmのときが良好であった。これは、弁開度と送風量の関係が非線形特性であることに起因していると考えられた。図8に示すように、弁開度と送風量の関係は、弁開度35%を境として大きく変化している。DO目標値2ppmの場合は弁開度範囲が12%ないし45%と、送風量変化の割合が大きい所で行なわれているのに対して、DO目標値4ppmの場合

は弁開度範囲が12%ないし70%と、送風量変化割合の大きい所と小さい所の両方で行なわれている。このように、DO目標値4ppmの場合、非線形特性の影響によって比例ゲインの値が弁開度により変動しているために精度の低下が生ずる。この対策として、弁開度と送風量の逆関数によって非線形特性を補正することが有効であると考えられる。

(2) DO測定値のふらつきによる弁動作頻度の増大

良好な制御が長期間行われた例($K_P=200\%$ ないし250%、 $K_I=3\text{min}$ ないし10min)について空気制御弁の動作頻度を調査してみると、一時的に10回/hを超える場合があった。この現象の原因は、 K_P や K_I の選定不良ではなく、DO計による測定値のふらつきによるものと考えられる。図9(a)に示すように、DO計のふらつきが $+0.4\text{ppm}$ になると、特に弁の動作頻度が増加する。これは、ふらつきが $+0.4\text{ppm}$ になると偏差値(目標値—測定値)が瞬間的に増大し、比例ゲイン K_P の働きにより調節計の出力が減少して弁は閉動作を行なう。ふらつき幅が0になると、弁は再び開動作を行なう。このようにして、弁の動作頻度はDO計の測定値のふらつきにより急速に増加する。これを防止するには、 K_P や K_I の調節によるのではなく、

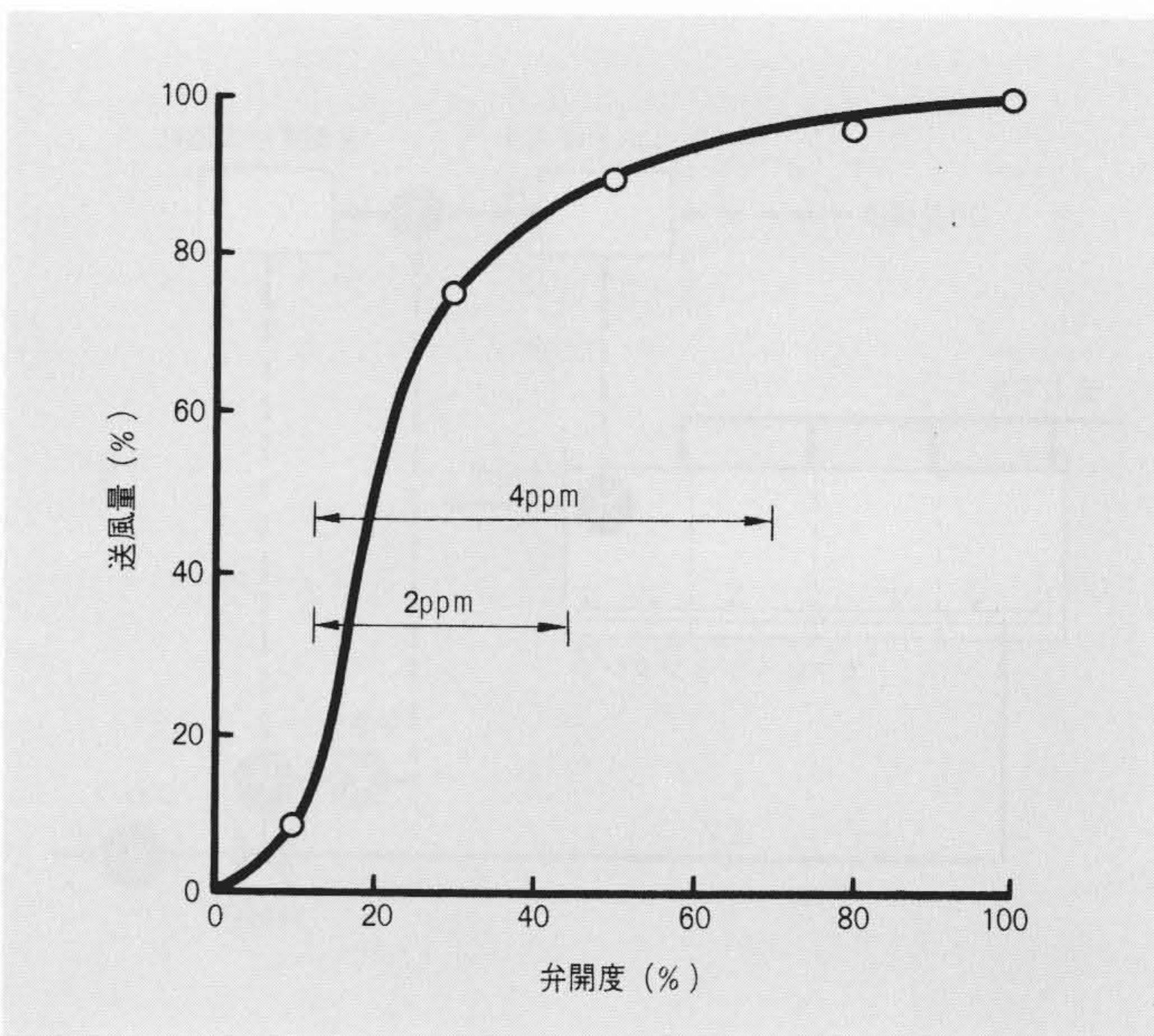
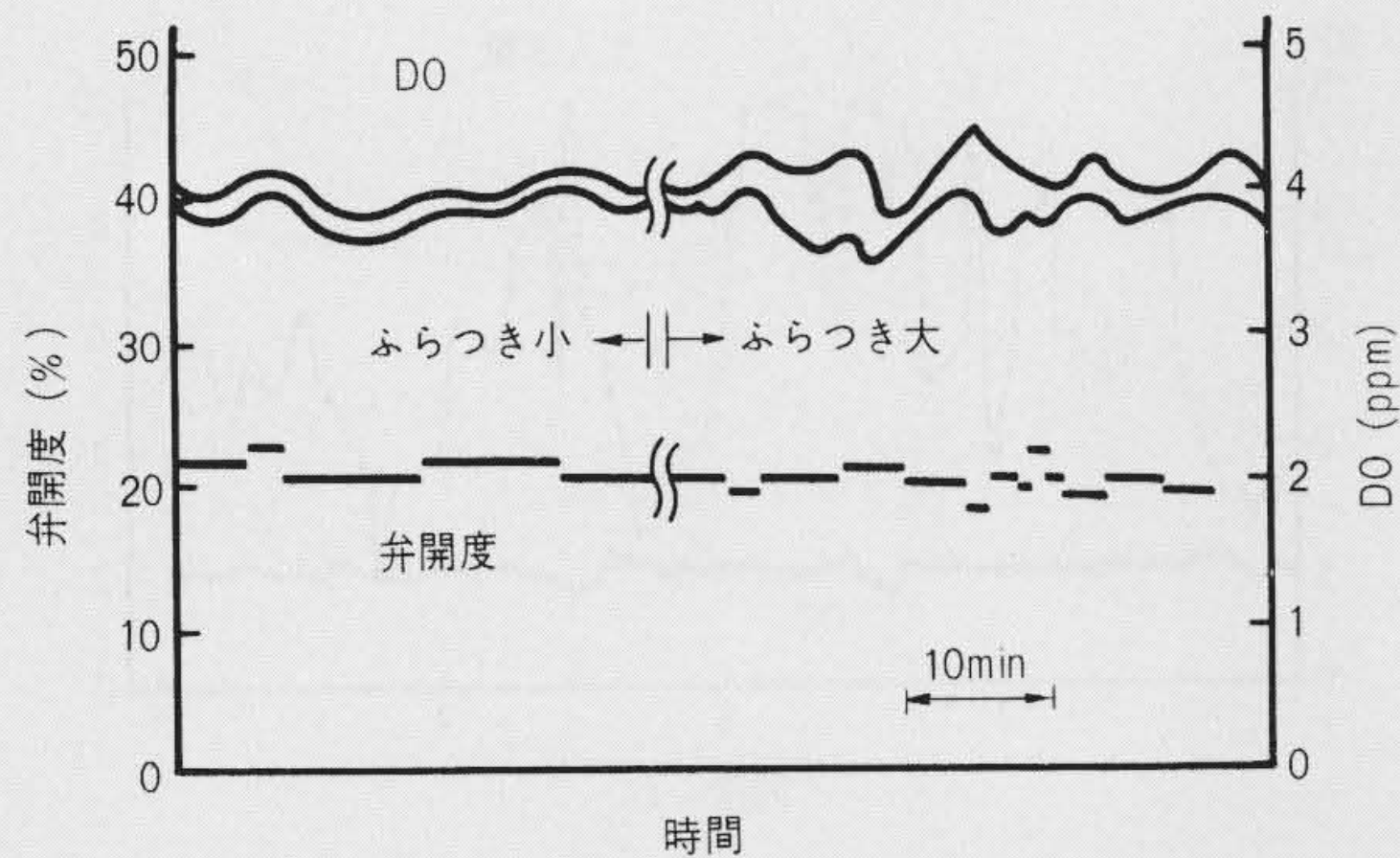
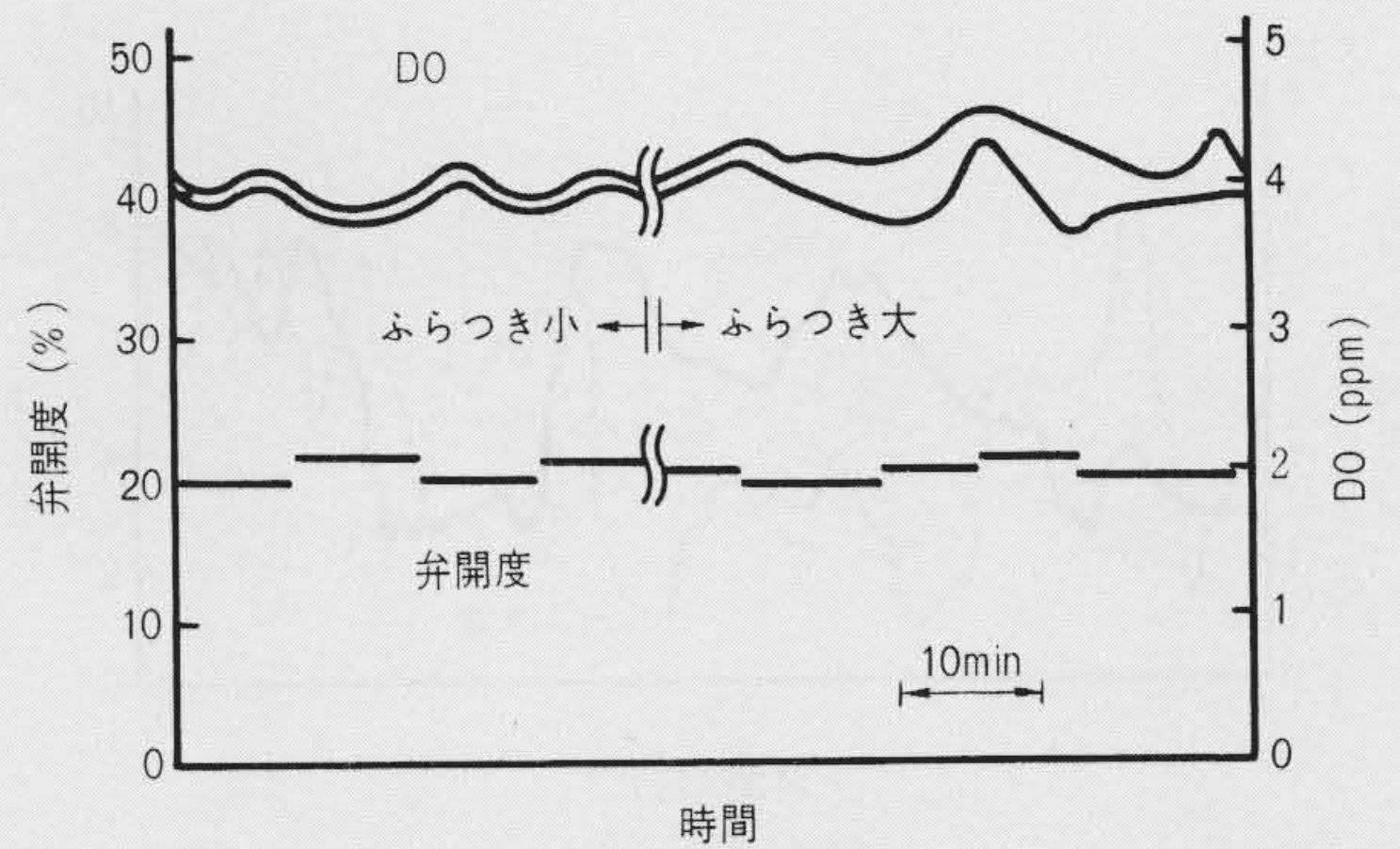


図8 弁開度と送風量の関係 弁開度と送風量の関係(特性)は、弁開度35%を境として大きく変化し、非線形となる。



(a) デジタルフィルタがない場合



(b) デジタルフィルタがある場合

図9 弁動作頻度に対するデジタルフィルタの効果 DO測定値のふらつきが大きい場合にフィルタの効果が表われることを示す。

DO測定値のふらつきを取り除くことが必要である。この方法として、DO計の出力信号をデジタルフィルタに通した実験を試みた。その結果は良好で、図9(b)に示すように、測定値のふらつきによる弁動作頻度を大幅に減少することができた。

8 デジタル制御システム

前述した問題点を解決する有効な手段の一つは、デジタル・コントローラの採用であろう。

そこで、次に示す五つの機能をもつデジタル・コントローラMINIDICを開発し、前述のアナログ・コントローラに並置した。

- (1) 入力データのフィルタリング
- (2) DOに基づくフィードバック制御
- (3) 流入水量に基づくフィードフォワード制御
- (4) 弁開度—送風量の非線形特性の補償
- (5) 弁開度のフィードバック補正

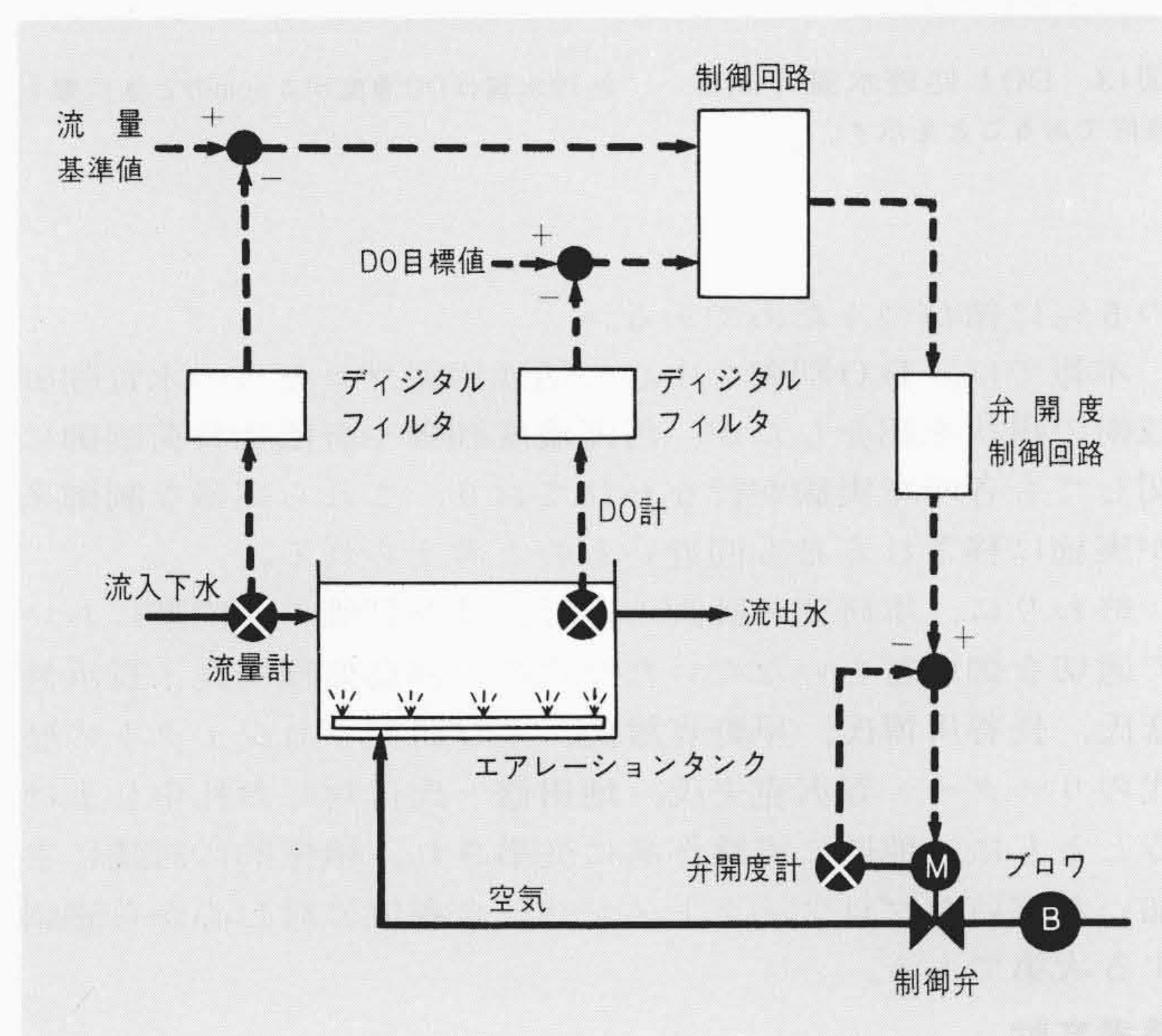


図10 デジタルDO制御システムのフローダイアグラム このシステムは、アナログ制御システムの問題点を踏まえて、五つの機能を持っている。

図10にデジタルDO制御システムのブロック図を示す。

9 デジタル・コントローラによる実験

デジタル・コントローラによる実験は3箇月にわたって行なわれた。制御データを解析した結果、DO測定値のふらつき幅が0.4ppmを超える場合の弁動作頻度は、アナログ・コントローラ適用時に比べて $\frac{1}{3}$ ないし $\frac{1}{2}$ に低下することが分かった(図9参照)。

10 評価実験

DOを目標値に安定させるための制御技術の取得を2年間にわたって、第1期実験を行なった。次の第2期実験の目的はDO制御評価、すなわち放流水質の向上、及び送風量の低減に関するDO制御の効果を明確にすることであった。

第2期実験は6箇月間にわたって行なった。実験は3週を1単位とし、第1週はアナログ制御、第2週はデジタル制御、第3週は手動制御とすることを原則とした。この実験ではMLSSを1,000ppm及び2,000ppmの2段階とし、手動操作によってMLSSを維持することとした。また、DO目標値を2ppm、4ppm、及び6ppmの3段階とした。

10.1 空気量の低減効果

約3箇月間に三つの非制御期間と三つの制御期間を設定した。図11に非制御時と制御時におけるDO経時変化の一例を示す。流入水量が大きく変動しているにもかかわらず、制御時にはDOが一定値に維持されている。また、それぞれの期間の平均DOと平均送風量を図12に示す。制御を行なうことによって送風量の低減効果があることが分かる。

同一のDO値を与える、手動運転期間における送風量を Q_{AM} 、制御期間における送風量を Q_{AC} とするとき、次式で定義される送風量低減率A.R.R.は表2に示すように求められた。

$$A.R.R. = \frac{Q_{AM} - Q_{AC}}{Q_{AM}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

10.2 処理水質に対するDO制御の効果

図13にDOと処理水質〔平均COD(化学的酸素要求量)と平均透視度〕の関係を示す。同図における平均CODと平均透視度は、午前10時に採水した処理水の日代表値のそれぞれの制御期間における平均値である。同図から、DO制御時の処理水COD及び透視度はエアレーションタンク出口のDOが4ppmのとき、最も低い水準に保たれていることが分かった。

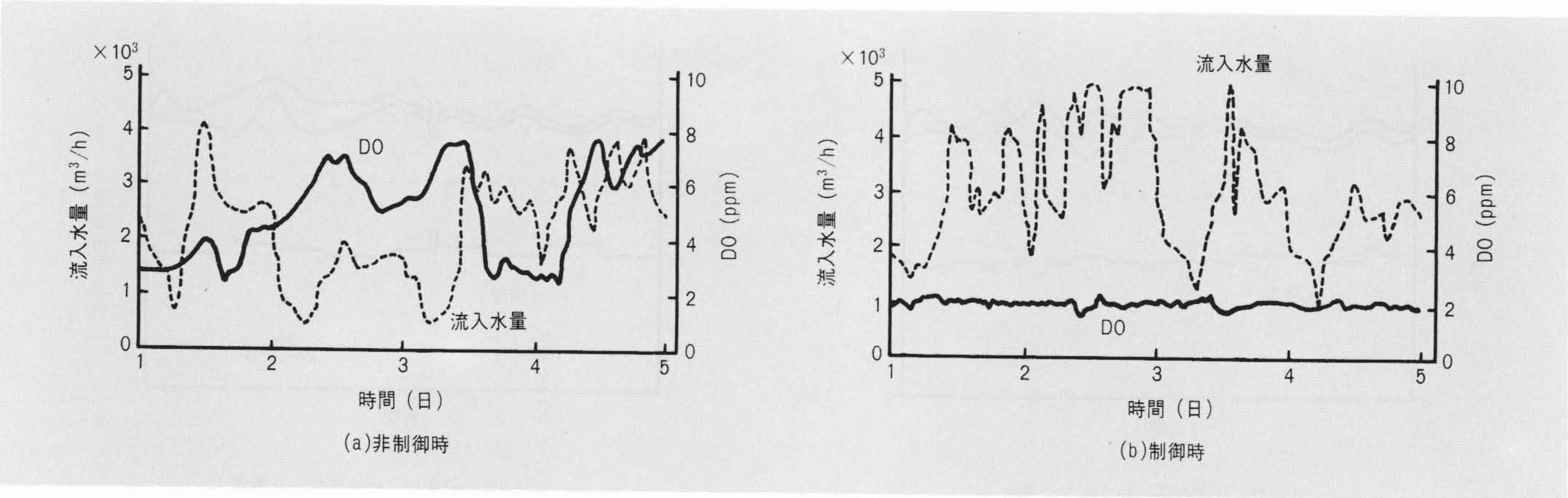


図11 非制御時と制御時におけるDO経時変化 流入水量が変動しても、DO濃度は制御することにより一定に維持されることを示す。

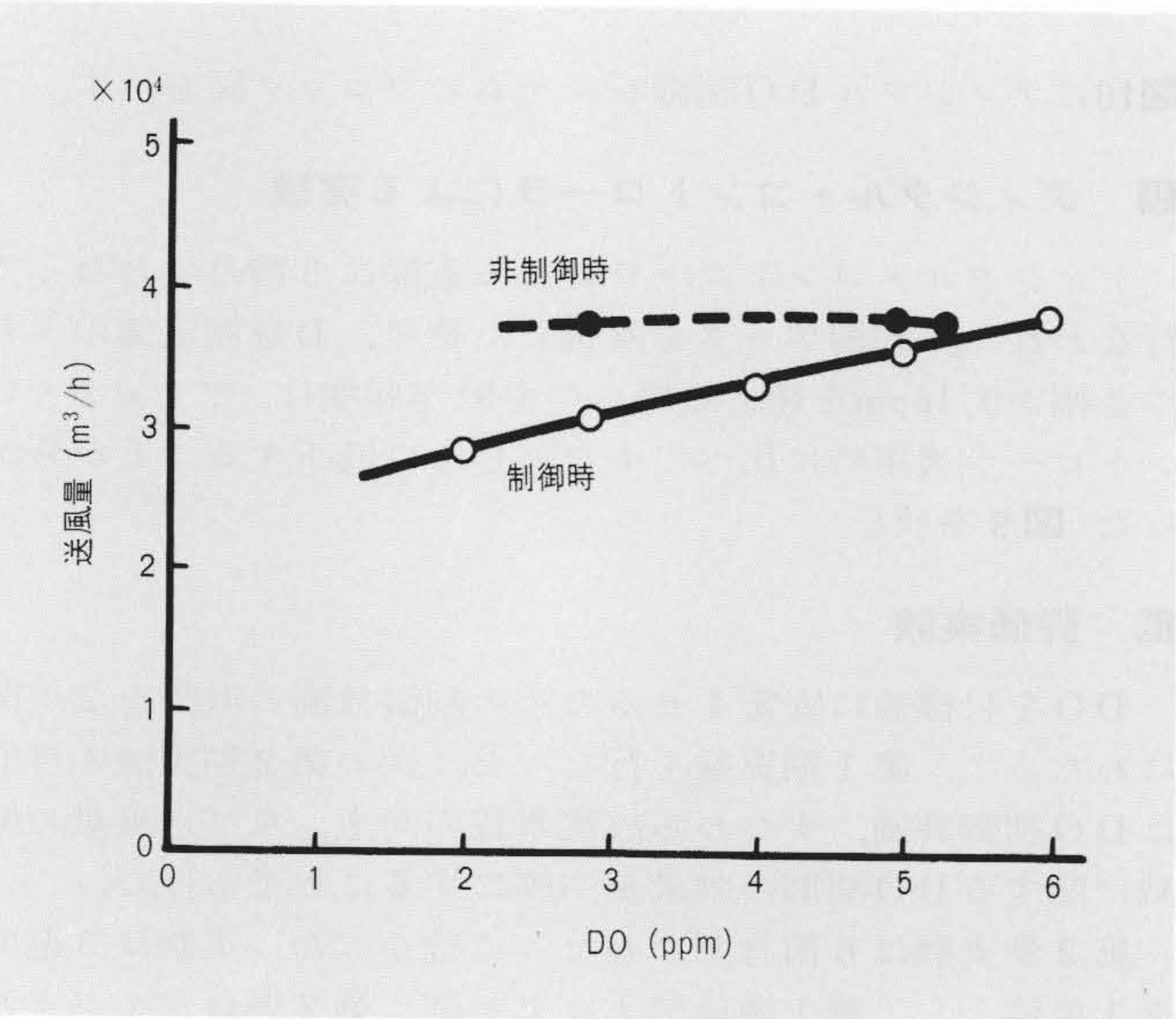


図12 DOと送風量の関係 自動制御を行なうことによって、送風量が低減されることを示す。

表2 DOに対する送風量低減率 DOが低濃度になるにつれて、送風量の低減効果が大いことを示す。

D O (ppm)	A.R.R. (%)
2.9	-18
5.0	-4
5.3	+1

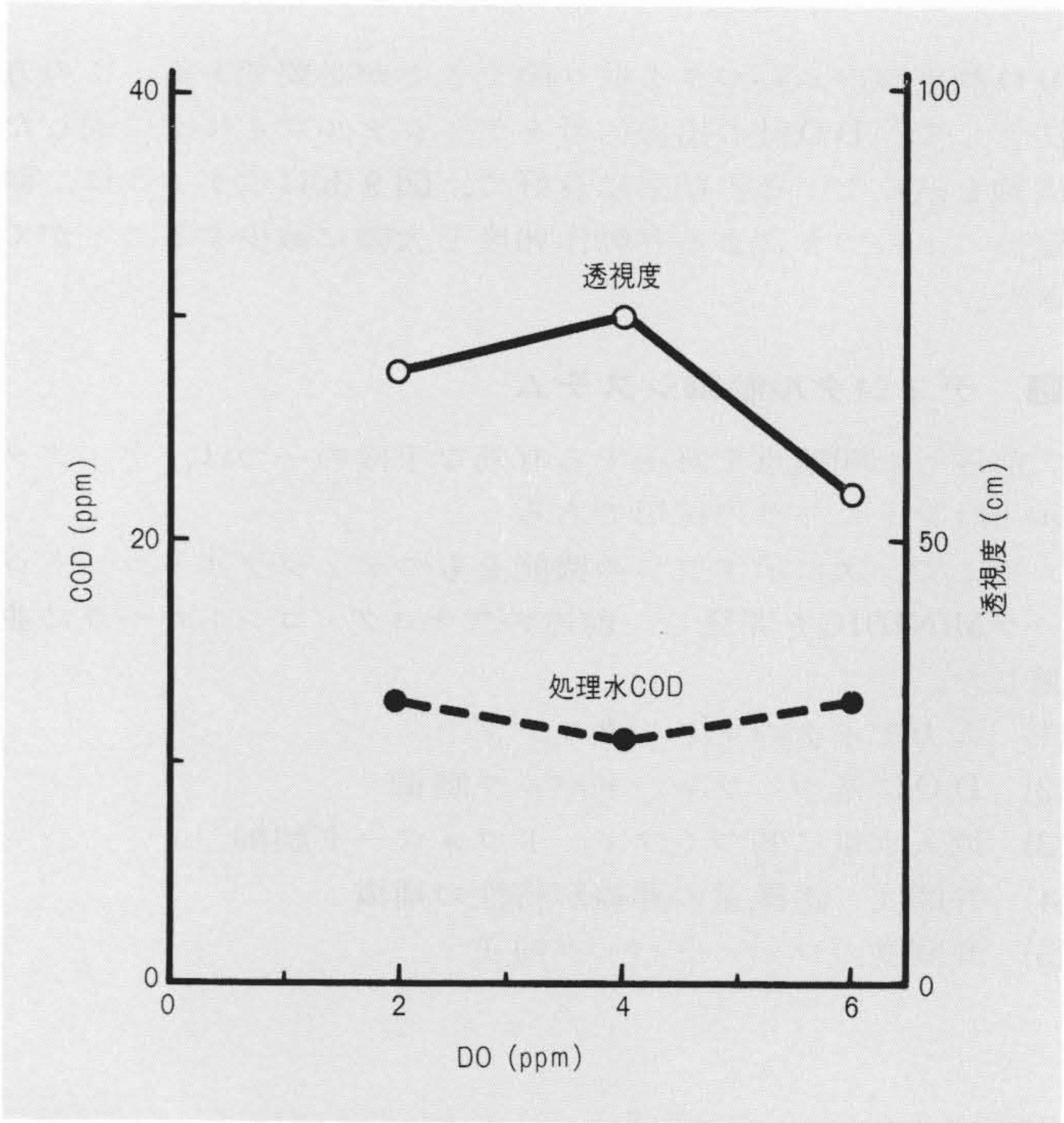


図13 DOと処理水質の関係 処理水質はDO濃度が4 ppmのときに最も良好であることを示す。

の5%に結びつくためである。
本報では、DO制御を中心に活性汚泥プロセスの水質制御技術の現状を紹介したが、汚泥濃度制御や有機物負荷制御に関しても各所で実験が行なわれており、これら高級な制御系が実施に移される日も間近いものと考えられる。

終わりに、本研究の計画と遂行、及び評価の各段階において適切な御助言をいただいた歴代の三河島処理場長・長浜健彦氏、長谷川博氏、早野克雄氏、及び研究プロジェクトの歴代のリーダー・寺沢克夫氏、地田修一氏に対しお礼申し上げるとともに、地道に実験作業に従事され、積極的に討議に参加いただいたプロジェクトメンバーの各位に対し心から感謝する次第である。

参考文献

1) 加藤ほか：エアレーションタンクの自動制御，下水道協会誌 12, 131 (昭50-4)

10 結 言

昭和48年6月から行なわれた活性汚泥プロセスに対するDO制御では、約3年間の実験期間に技術的障害がすべて克服され、昭和51年4月からDO制御は処理系の平常業務に移された。
DO制御によって処理の安定化が達成され、かつ、送風量の節約は10%以上に達することが明らかにされた。これによって、水質制御の経済的効果が立証されたといえる。なぜならば、エアレーション用ブロワの消費電力は処理場総消費電力のおよそ半分以上を占めるから、送風量節約の10%は電力費用