

エアレーションタンクのDOプロフィール制御

*1 田沼 良平(たぬま りょうへい)

*1 佐々木康成(ささき こうせい)

*2 松永 岩夫(まつなが いわお)

*2 初又 繁(はつまた しげる)

1 まえがき

活性汚泥プロセスの溶存酸素(DO)制御は、エアレーションブローアの電力節減と処理水質の安定化に寄与するものとして脚光を浴び、多くの下水処理場で実施されるようになった。特に石油ショック以来の省エネルギー指向とマイクロコンピュータの発達、更にDOセンサの信頼性の向上がDO制御をより身近なものにしたと言える。ところが、このような時代の要請の中で新たにクローズアップされてきたのは、エアレーションタンクのどの地点でDO濃度を検出し、いかなる値に制御したら良いかという極めて現実的、かつ基本的な問題である。

この問題に対する一つの解答はOlssonらによって与えられた⁽¹⁾。エアレーションタンク内のDO濃度はタンク前半で低く、処理が進むにつれて上昇する。このような流下方向へのDO濃度変化、すなわちDOプロフィールはプロセスの状態を反映したものであることから、彼らはDOプロフィールを適正に維持するような制御を提唱した。ところが、DOプロフィールを知るためには、異なった地点でのDO測定が必要になる。そして多点測定によるこの方法は、原理的には可能であっても、センサ間の相対誤差により信頼性の低下を招くばかりでなく、センサのメンテナンス頻度が増加するといった大きな問題をかかえている。

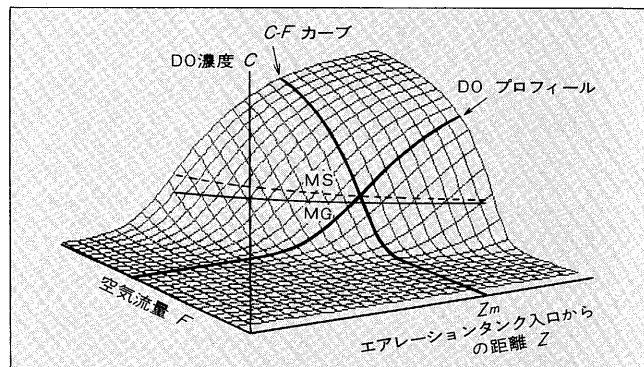
これに対し、我々はDOプロフィールそのものを問題にするのではなく、その変曲点に着目した。DO濃度は、酸素要求量の高いエアレーションタンク前半ではほとんど零であり、処理がほぼ完了する地点から急上昇する。したがって、DOプロフィールの変曲点は、処理が終わったことの目安であるとともに、微生物が酸欠状態にあるタンク前半部分と十分に酸素が供給される後半部分の境界を示している。すなわち、変曲点の制御は、微生物の酸素充足度と処理効率の制御を意味する。我々は、この変曲点を目的の場所に固定する方法を開発した⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。この制御ではその目標地点において、空気量変化に対するDO濃度変化のゲインが最大になるように制御設定値が調節される。したがって、DOセンサは一つで済む。以下では本法の原理、及びパイロットプラントにおける実験結果について述べる。

2 原理

2.1 DOプロフィールとプロセスゲイン

エアレーションタンク内の流動状態を押出し流れと仮定すると、DO濃度 C (mg/l)、基質濃度 S (mg/l)、及び

図1 C-F曲線とDOプロフィール



エアレーション空気量 F (m³/h)の関係は次の偏微分方程式で記述できる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -V \frac{\partial S}{\partial Z} - \frac{k_1 S C}{k_2 + C} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial Z} + k_3 F (C_s - C) - \frac{C (k_4 S + k_5)}{k_2 + C} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V は流下速度(m/h)、 Z はエアレーションタンク流入側からの距離(m)、 C_s は飽和DO濃度(mg/l)、 $k_1 \sim k_5$ は定数である。定常状態($\partial S / \partial t = 0$, $\partial C / \partial t = 0$)を考え、式(1)、(2)の数値解を求めると、 C を F と Z の関数として表すことができる。すなわち、 C 、 F 、 Z の関係は曲面(Z - F - C 曲面)となり、これを透視図として描くと図1が得られる。この図は F の増加によりDOプロフィールが前方に移動し、それに伴ってエアレーションタンクの特定の地点(例えば、 $Z = Z_m$)におけるDO濃度が図中に示したC-F曲線のように変化することを示している。また、図中の破線MSは移動するプロフィール曲線の変曲点が描く曲線であり、実線MGは各地点におけるC-F曲線の変曲点を結んだものである。この図が示すように、MSとMGはほぼ同じレベルにある。したがって、特定の地点で F の変化に対する C の変化、すなわちゲインが最大になるようなレベルにDO濃度を制御すると、DOプロフィールの変曲点はその地点に固定されることになる。

2.2 適応折線近似

図2は実験により求めたC-F曲線である。この曲線の変曲点でゲインは最大になる。変曲点を見いだすために、我々はC-F曲線を折線で近似することを考えた。折線の屈曲点は問題とする時間区間内の C の平均値上にあるものとし、図に示したように、折線の下部分のこう配を α_1 、上の部分のこう配を α_2 とする。変曲点では $\alpha_1 = \alpha_2$ で

*1(株)富士電機総合研究所 応用装置研究所 *2総合技術第二部 水処理技術部

あるから、 α_1 と α_2 をオンライン同定し、これらが等しくなるように DO 制御の設定値を調整することによりゲイン極大化が達成される。

α_1 と α_2 の同定にはモデル規範適応システム (MRAS)⁽⁷⁾ を用いる。MRAS は実際のプロセスとその動特性を近似するモデルとから成り、プロセス出力とモデル出力が一致するようにモデルのパラメータを自動調節する。 F の変化に対する C の応答は近似的に一次遅れとなるが、これに上記の折線近似を組み込むと、プロセスの動特性は、

$$\left. \begin{aligned} T \frac{dx}{dt} + x &= \alpha_i u \\ i &= \begin{cases} 1 & \text{for } C \leq \bar{C} \\ 2 & \text{for } C > \bar{C} \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

図 2 C-F 静特性と折線近似

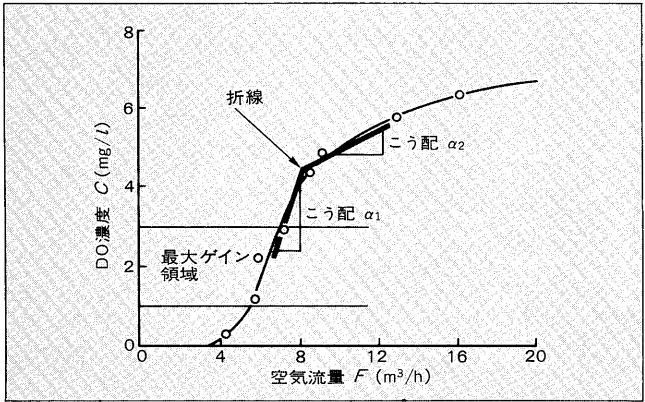


図 3 制御演算のブロック線図

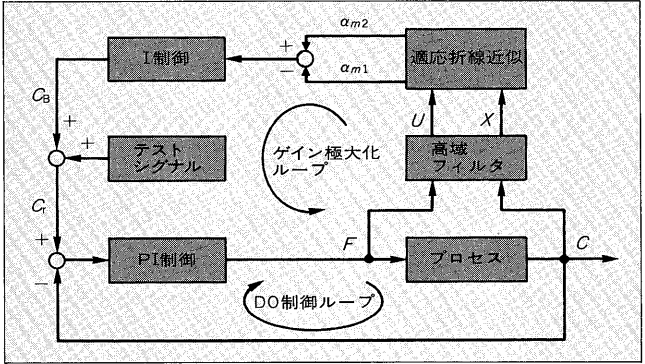
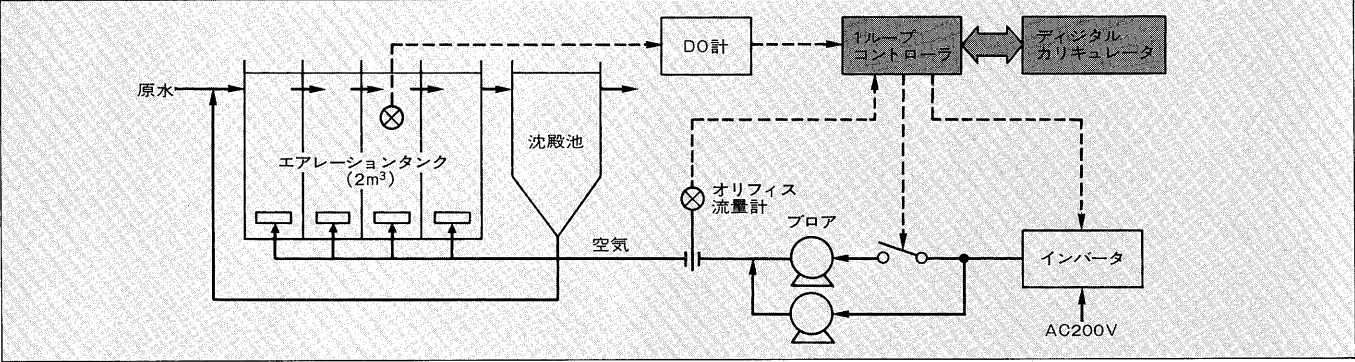


図 4 実験プラントの概要



で表すことができる。ここで、 T は時定数、 x と u はそれぞれ C と F を高域フィルタ (Washout Filter) に通し、直流成分を除去した信号、 $\bar{C}$ は C の平均値である。これに対するパラメータ同定用の推定モデルは次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} T_m(t) \frac{dx_m}{dt} + x_m &= \alpha_{m1}(t) g_1(u) + \alpha_{m2}(t) g_2(u) \\ g_1(u) &= \begin{cases} u & \text{for } C \leq \bar{C} \\ 0 & \text{for } C > \bar{C} \end{cases} \\ g_2(u) &= \begin{cases} 0 & \text{for } C \leq \bar{C} \\ u & \text{for } C > \bar{C} \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 x_m は推定モデルの出力である。また $\alpha_{m1}(t)$, $\alpha_{m2}(t)$, $T_m(t)$ は適応パラメータであり、出力誤差 $e = x - x_m$ が零になるように調整される。このためのパラメータ調整則は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{m1}(t) &= \alpha_{m1}(0) + k_a \int_0^t e g_1(u) dt \\ \alpha_{m2}(t) &= \alpha_{m2}(0) + k_a \int_0^t e g_2(u) dt \\ T_m(t) &= T_m(0) - k_T \int_0^t e x_m dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 k_a と k_T は適応ゲインである。初期値を $\alpha_{m1}(0)$, $\alpha_{m2}(0)$, $T_m(0)$ としてそれぞれの概算値を与え、MRAS を作動させると、 $e \neq 0$ である限りパラメータ値は式(5)により更新され、 α_1 , α_2 , T に収束する。したがって、 $\alpha_{m1}(t) = \alpha_{m2}(t)$ となるように設定値を調節することにより DO 濃度はゲインが最大になるようなレベルに達する。上記のように、プロセス出力の平均値の近傍でオンライン的に折線近似を行う方法を適応折線近似と呼ぶ。

2.3 制御システム

ゲイン極大化 DO 制御システムのブロック線図を図 3 に示す。システムは DO 制御ループとゲイン極大化ループから成る。DO 制御ループは DO 濃度 C を設定値 C_r にフィードバック制御する。制御方式は PI 制御である。ゲイン極大化ループはパラメータ同定により α_{m1} と α_{m2} を求め、 $\alpha_{m2} = \alpha_{m1}$ となるように I 制御で設定値の基準値 C_B を調節する。適応折線近似を行うためには、 C が常に一定範囲で変動している必要がある。そこで、 C_B にテスト信号を加えた量を設定値 C_r とする。

③ 実験プラント

実験は富士電機総合研究所内の食堂廃水处理プラントで行った。概要を図4に示す。エアレーションタンク(2m³)は4槽に分割されており、流入側から3番目の槽にDOセンサが設置してある。演算装置としては、パーソナルコンピュータ、あるいは汎用デジタルコントローラを用いたが、ここでは後者の場合を示す。制御演算により求めた目標空気量は、空気量制御ループに設定値として入力され、

オリフィス流量計により測定した空気量が設定値に等しくなるようにプロアの回転速度が調節される。プロアは2台使用し、そのうち1台は空気量が少ない時は停止するようにした。

④ 実験結果と考察

図5は約5日間の制御実験(実験1)のトレンドグラフである。この実験では、演算装置としてパーソナルコンピュータを用いた。制御はC_B=0.5mg/lでスタートした。制

図5 制御実験の結果(実験1)

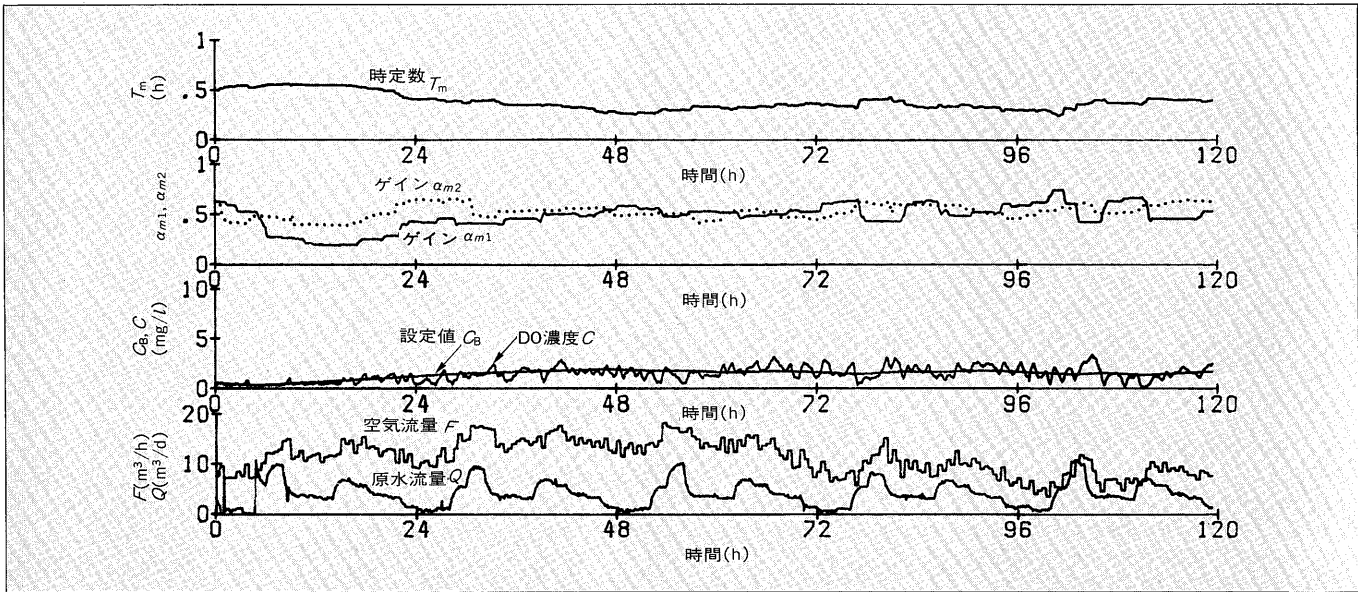


図6 長期制御実験の結果(実験2)

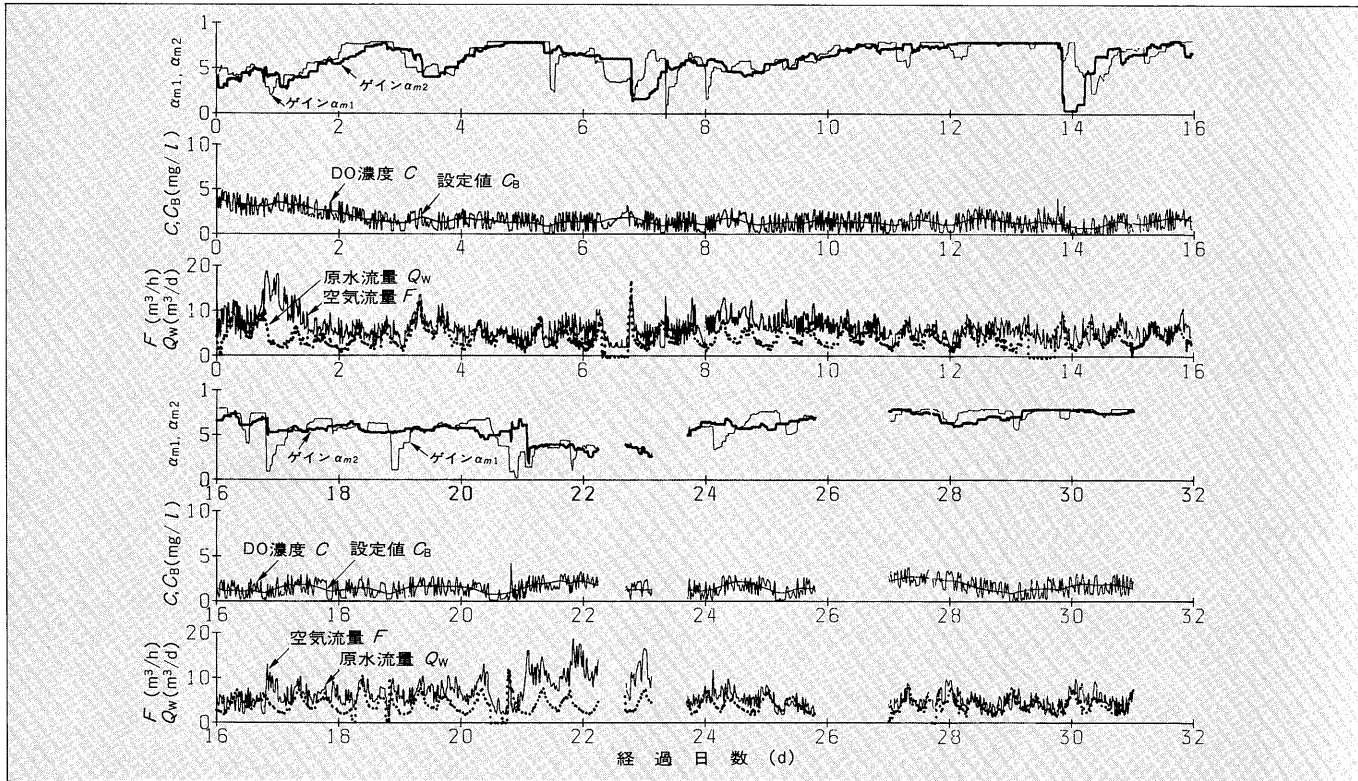
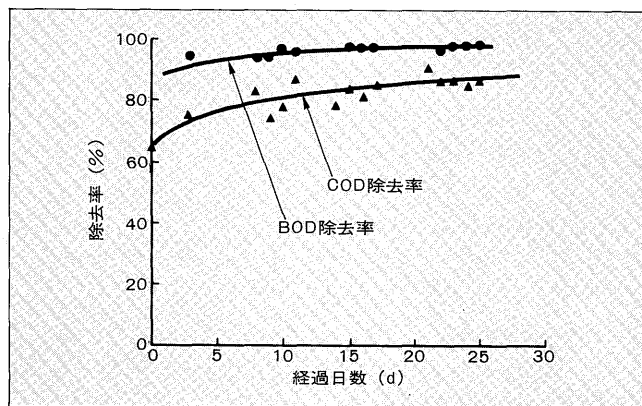


図7 制御期間中のBOD, COD 除去率



御開始直後 C_B は若干減少するが、5～6時間後には上昇に転じ、約2日後にはほぼ一定値に達している。その後 C_B は、1.5～2 mg/l に維持され、DO 濃度 C は C_B を中心に約±1mg/l の範囲に制御されている。MRAS は安定して作動しており、グラフから C_B が低い時は $\alpha_{m1} < \alpha_{m2}$ であったものが、変曲点に近づくにつれて両者が歩み寄って行く様子がよくわかる。定常に達した後の C_B の値を図2の変曲点のDOレベルと比較すると両者は良く一致しており、変曲点制御の目的を達している。この実験では、DO制御ループは通常のPIアルゴリズムで算出される出力を30分ごとにサンプルし、ホールドした値を実際の目標空気量としている。このような方法は、電動弁などの操作端を用いる場合で、弁の頻繁な動作が許されないような場合有効である。ただし、間欠操作では制御性能が低下するため、それを補う手段が必要になる。そこでこの実験では、流入水量によるフィードフォワード制御を併用している。

図6は約1か月間の長期制御実験(実験2)の結果である。 $C_B=4\text{mg/l}$ で開始した制御は3日で定常となり、その後 C_B は1～2mg/l に維持されている。この実験では制御演算は1ループコントローラ及びディジタルカリキュレータで行い、空気量はPI制御により連続的に操作している。制御時の水質も良好で、流入BOD 540mg/l、BOD 負荷 0.7kg/kg MLSS とやや高負荷であったが、処理水BOD 19.8mg/l、BOD 除去率96%を得た。同様にしてCOD 除去率83%を示した。図7に制御が進むにつれて、BOD、COD 除去率が高くなって行く様子を示す。

上記の二つの実験では電力消費量を記録し、これをもとに制御による電力削減効果を検討した。制御を行わない時の値として、ピーク負荷時に1mg/l のDO濃度を保証できるように一定空気量での電力消費量を求め、これと制御時の値を比較した。その結果、電力削減率は実験1で17%、実験2では13%であった。ただし、省エネルギー率は基準の取り方、負荷変動の度合などにより大きく異なるため、これらの数字は一応の目安と考えるべきであろう。

以上の実験結果から本方式によるDO制御が高い安定性を有する実用的な方法であると結論できる。

はじめにも述べたように、この制御は一つのDOセンサで実施することができる。そして更に重要なことは、設定値の調節がDO濃度の絶対量とは無関係に、ゲインの大小のみに基づいて行われるということである。このことは、センサのドリフトが自動的に補償されるという利点を生む。例えば、内部液の特性変化などにより、DOセンサの出力が徐々に低下する場合を考えよう。このような場合、測定DO値に基づく変曲点レベルも当然低下するため、設定値は下方修正される。その結果、実際のDOレベルは変化しない。この自動補償機能は実用上特に重要で、センサが一つで済むということと並んで、本方式の大きな特徴となっている。

5 あとがき

以上紹介したDO制御法は、エアレーションタンク内の生物化学反応の特性を利用して設定値を自動調整するというユニークな制御法である。実験はパイロットプラントで行ったが、本質的には実プラントと変わるところはなく、我々はこの制御が実際の処理場でも問題なく実施できるものと考えている。

参考文献

- (1) Olsson, G. & Andrews, J.F.: The Dissolved Oxygen Profile—a Valuable Tool for Control of the Activated Sludge Process, Water Research, **12**, 11, pp.985～1004 (1978)
- (2) 田沼良平ほか:ゲイン極大化法による活性汚泥プロセスのDOプロファイル制御, 水システム自動計測制御ワークショップ, pp.141～144 (1984)
- (3) Tanuma R. et al.: Gain-Maximizing Dissolved Oxygen Control Using Adaptive Broken Line Fitting in the Activated Sludge Process, 第5回適応制御シンポジウム資料, 計測自動制御学会, pp.17～22 (1985)
- (4) Tanuma R. et al.: Gain-Maximizing Dissolved Oxygen Control in the Activated Sludge Process, Advances in Water Pollution Control, Instrument and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems, Pergamon Press, pp.261～268 (1985)
- (5) 田沼良平ほか:ゲイン極大化法による活性汚泥プロセスのDO制御——長期安定性の検討——, 第22回下水道研究発表会講演集, pp.451～453 (1985)
- (6) Tanuma R. et al.: Gain-Maximizing Dissolved Oxygen Control Using Discrete-time Adaptive Broken Line Fitting in the Activated Sludge Process, 第6回適応制御シンポジウム資料, 計測自動制御学会, pp.65～68 (1986)
- (7) Landau I.D., 富塚誠義:適応制御システムの理論と実際, オーム社 (1981)



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。