

浄水場塩素注入制御モデルの選択

関東芝重電技術研究所 ○三浦 良輔、渡守 修

1. はじめに

浄水場における塩素注入は、沈殿池やろ過池の保護、塩素の過剰注入や注入不足の防止、最近では有機塩素化合物の発生の低減、などのためにより精度の高い制御が望まれている。しかしながら、浄水場の土木構造・機械電気設備、水処理の方法、および水質計測の手段や他の計装設備、さらに取水する原水の水質とその変動がさまざまであるために、ある特定の浄水場で適合した制御方式が、かならずしも他の浄水場では有効でない場合が多い。さらに一般的に言って制御方式も多数あり、それらすべてについて実現場で検討することは、時間的かつ労力的に不可能である。したがって実装しようとする制御方式（制御モデル）について、十分に事前評価し対象の浄水場の上記諸特性に最も適合したものを選択しておかねばならない。

本発表の薬品注入制御用シミュレータは、この課題にたいする解答の一試案で、制御モデルの構成（モデルの選択と修正）、諸制御パラメータの決定をおこなうものである。とくに前塩素注入制御モデルについて種々のシミュレーション実験を行ない、興味ある結果が得られたので報告する。

2. シミュレータの構成と機能

図1に薬品注入制御用シミュレータの基本構成をしめした。以下に各要素の機能について概略を述べる。

- (1) データの保存：運転操作量（処理水量、薬品使用量）、水質検査のオリジナルデータ、およびプロセス計測器での監視データなどの操作、監視、研究などのために収集した分析・計測値を媒体に記憶させる。
- (2) プラント設計諸元ファイル：計画水量、着水井、急速混和池、フロック形成池、薬品沈殿池、急速ろ過池、塩素混和池、浄水池、および導水管等の諸元、および薬品注入設備や計装設備の構成などについて数値化してファイルする。
- (3) データ処理：異常値の修正、シミュレーション実験の目的に合うデータの加工をおこなう。
- (4) モデリング：着水井から浄水池までの流下する水の混合・流動特性、酸-アルカリの中和反応（炭酸塩-一次亜塩素酸塩システム）、塩素の分解消失反応、凝集反応とフロック形成反応、沈殿およびろ過のメカニズム、などのプロセス特性の数学モデル、および原水水質の流入特性の数学モデルなど、の部分モデルを作成してこれらを統合してシミュレータのプロセスモデルとする。
- (5) パラメータの探索：上記各数学モデルのパラメータ、および制御ゲイン、制御周期、諸目標値、制約条件、重み係数などを決定する。
- (6) 制御モデルのリスト：凝集剤注入、アルカリ剤注入、塩素注入、およびその他の薬品注入の制御に使用する制御方式のリストである。
- (7) 評価基準のリスト：制御の目標値からの偏差、シミュレーション計算値と実測値の誤差、変数間の相関性、回帰誤差などの適合度、および滞留時間や伝達時間、粒子の沈降速度分布、ろ過池水位の上昇速度、などの水処理管理指標について、評価基準を定義する。
- (8) 実験の編集：シミュレーション実験をおこなう制御モデルと評価基準を選定または修正し、実験計画を立てる。（たとえば、実験課題

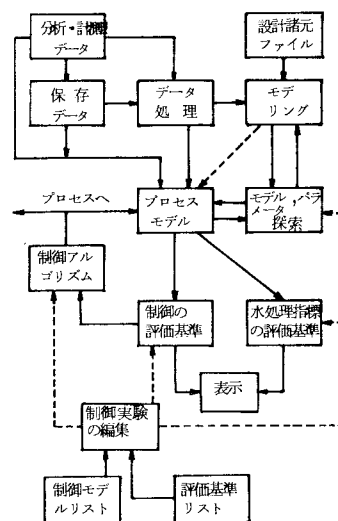


図1. 薬品注入制御用シミュレータの構成

＝残留塩素濃度の検水取水点をフロック形成池出口とした場合の積分制御の特性を調べよ，など。）

(9) 表示：実験課題にたいする回答，およびフロック形成，沈殿，ろ過状態や処理水質の時系列値を表示する。

3. 実験

3.1 プロセスモデル：日間処理水量約30万トンで，着水井，急速かく拌池，フロック形成池，薬品沈殿と傾斜板式沈殿の複合形沈殿池，急速ろ過池，塩素混和池，および浄水池とから成り，凝集剤および補助剤としてPACおよび苛性ソーダ，消毒剤と塩素ガスを用いる浄水場のプロセスを設計図面を参考としてモデル化した。塩素の分解消失は，①原水の塩素要求物質との反応，②沈殿池での日射・風による消失，③ろ過池での分解，によって生じるものとした。とくに塩素要求物質として，塩素との反応速度の違いによって3種に分類した。反応速度は次式に従うものとした。またろ過池では一定の比率で塩素が消失するものとした。

$$\Delta CD_i = \frac{RC}{K_{sc} + RC} \cdot \frac{CD_i}{K_{si} + CD_i} \cdot CD_i \cdot (1 - e^{-K_{di} \cdot T_d}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで， ΔCD_i は1計算周期に減少する第*i*種塩素要求物質濃度，RCは残留塩素濃度， T_d は各槽での滞留時間(H)， K_{di} は反応速度定数である。したがって塩素の分解速度は， $\Delta RC = \Delta CD_1 + \Delta CD_2 + \Delta CD_3$ 。

また第1種，第2種，第3種塩素要求物質の塩素との反応は，それぞれ10分，80分，240分で90%分解するとし，定数 K_{di} を定めた。

3.2 塩素注入制御モデル：比例-積分(P I)制御のアルゴリズムを基本とし種々の改良形フィードバック制御方式を制御モデルリストから出し，必要に応じ修正して用いた。

(A) 標準形P I制御
$$E_n = S V - P V \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\left. \begin{array}{l} S V = \text{目標値} \\ P V = \text{プロセス値 (RC)} \\ K_p = \text{比例ゲイン} \\ K_c = \text{カスケードゲイン} \end{array} \right\}$	$h = \text{制御周期}$	$\left. \begin{array}{l} T_i = \text{積分時間} \\ S_n = \text{操作用出力} \end{array} \right\}$	$\Delta S = K_p \cdot (E_n - E_{n-1}) + \frac{h}{T_i} \cdot E_n \quad \dots\dots\dots (3)$
	$S_n = S_n + K_c \cdot \Delta S \quad \dots\dots\dots (4)$		

(B) 塩素消失量推定による適応制御-残留塩素濃度RC測定点での潜在的(塩素の分解がなく混合のみを受けたとした場合の)注入塩素濃度とRCの差の1次差分によって，上記式(3)の積分ゲイン， $h/T_i = K_i$ を適応修正するものである。

$$\left[\begin{array}{l} C L = \text{潜在的注入塩素濃度} \\ K_{i0}, A_{ki} = \text{定数} \end{array} \right] \quad DCL_n = CL - RC \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta DCL = DCL_n - DCL_{n-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$K_i = K_{i0} + A_{ki} \cdot |\Delta DCL| \quad \dots\dots\dots (7)$$

(C) 注入率Sの変曲点で操作用出力を一定時間Ht保持する制御

$$\left[\begin{array}{l} H t = \text{保持時間, } H_{t0}, Q_0 \\ Q = \text{処理水量, } A_h, B_h \end{array} \right\} \text{定数} \quad H_t = H_{t0} + A_h \cdot \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{B_h} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(D) カスケードゲインKcを注入率Sによって修正する制御

$$\left[\begin{array}{l} K_{c0}, A_c \\ B_c, C_c \end{array} \right\} \text{定数} \quad K_c = K_{c0} + A_c \cdot (B_c - S)^{C_c} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(E) 改良形P I制御-残留塩素濃度RCとその1次差分の値からステップ的に注入率を修正するP I制御で，残留塩素濃度をその目標値を中心にクラス分けし，そのクラスにおける上記1次差分が設定の上下限值Dccを越えた場合，ステップ的に注入率の変化量Devを発生させるようにした制御である。

(F) 気象条件(日射量)による適応制御-予測される日射量を前倒的に修正して，その修正量で残留塩素の目標値SVと出力値Snを同時に修正する制御である。

3.3 PH一定制御：以下に記すシミュレーション実験では，凝集剤としてPAC，アルカリ剤にNaOH，塩素剤に塩素ガスを使用したものである。塩素の分解消失はPHに依存するため，以下に述べるアルカリ剤注入制御

によってPHを一定に保った。図2にPH制御のブロックを示す。薬品注入後の検水のアルカリ度ALK, PHおよび残留塩素濃度RCの測定値から炭酸塩一次亜塩素酸塩システムで全炭酸濃度CT, RCから緩衝能 β を計算する。この β とPHおよびPHの目標値PHSからアルカリ度の偏差ENを次式で計算する。このENを入力するPI制御の計算によって制御出力

$$EN = \beta \cdot (PHS - PH) \dots \dots \dots (10)$$

SNを求める。一方酸性物質である凝集剤PACと塩素の注入量からアルカリ量の補償量 ΔPC を計算し、合計値 $SN + \Delta PC$ をNaOHの注入率とする。

3.4 制御外乱としての塩素要求量の変化：図3に原水の塩素要求量およびその組成(第1種, 第2種, 第3種の割合)を示した。

3.5 制御シミュレーション実験

【課題】-着水井出口で前塩素注入し, 残留塩素の検水の取水点が急速混和池出口である時とフロック形成池出口である時の2通りについて, 沈殿池出口水の残留塩素濃度が0.5 ppm以上である制御モデルを選ぶ。

4. 結果と考察

図4に定常運転時に図3の原水外乱が流入し, 制御を行なわなかった場合の残留塩素の変化を示した。

4.1 急速混和池で検水を取水したときの結果：図5にPI制御の結果を示す。積分ゲイン K_i は1.2である。ゲインをこれ以上高くしても沈殿水のRCは改善されない。これは図3に示したように塩素との反応の遅い第2種および第3種の塩素要求物質が, 沈殿池でゆっくりと分解するためである。図6に改良形PI制御のシミュレーション結果を示す。図5の標準形PIより制御性は若干改善される。図7と図8は塩素消失量推定に

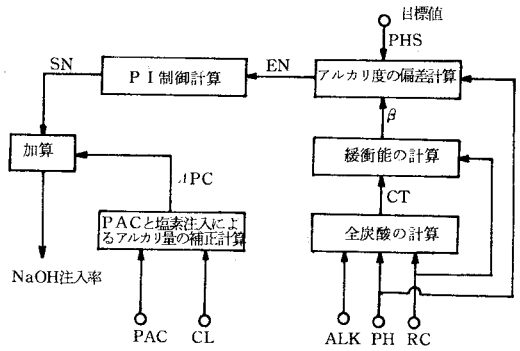


図2. PH (アルカリ剤注入) 制御ブロック

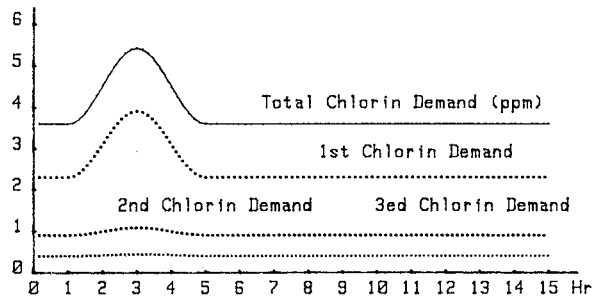


図3. 原水塩素要求量の変動

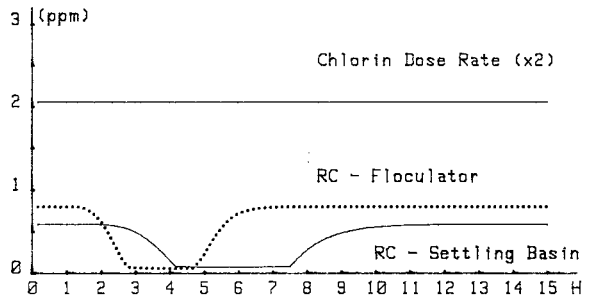


図4. 非制御時の外乱応答

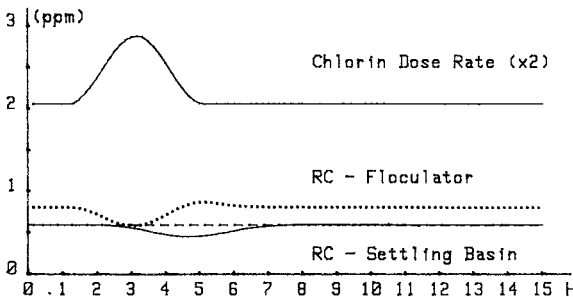


図5. 標準形PI制御

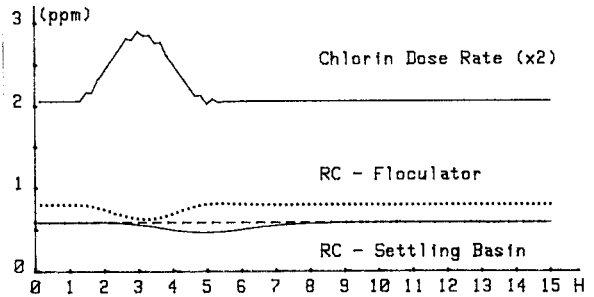


図6. 改良形PI制御

よる積分ゲイン制御の結果で, 式(7)の A_{ki} が前者で2.0, 後者で8.0と高くしたものである。ゲインを高くすると注入率Sはオーバーシュートし, かつ制御性も悪くなる。

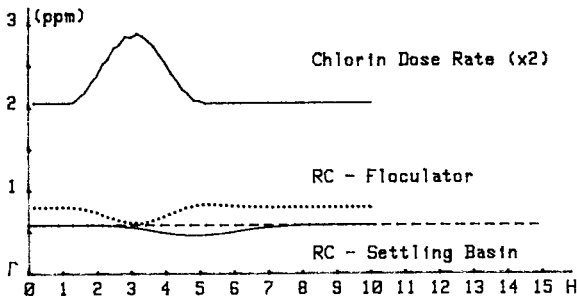


図 7. 低ゲインの適応制御

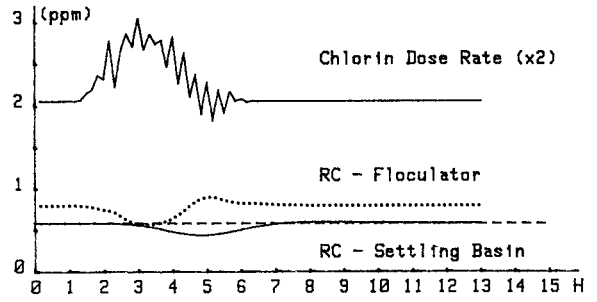


図 8. 高ゲインの適応制御

4.2 フロック形成池で検水を取水した時の結果：図 9 に積分ゲインを 0.33 (積分時間は 30 分) とした時の標準形 P I 制御結果を示す。積分ゲインがこの値以上であると発散してしまい、低いと応答遅れが大きくなる。沈殿水の RC も 0.5 ppm を大巾に割り、この制御モデルは不適當である。図 10 は塩素分解量推定による適応制御の修正法で、式(7)の右辺第 2 項の値を式(4)の右辺に和した制御を行なった結果である。図 9 の標準形 P I 制御に比べ、制御性は大幅に改善されるが、課題の目的には合わない。図 11 は改良形 P I 制御の結果である。

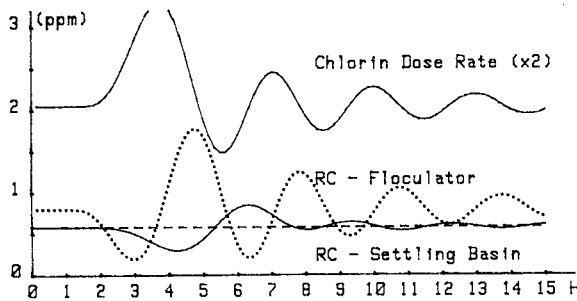


図 9. 標準形 P I 制御

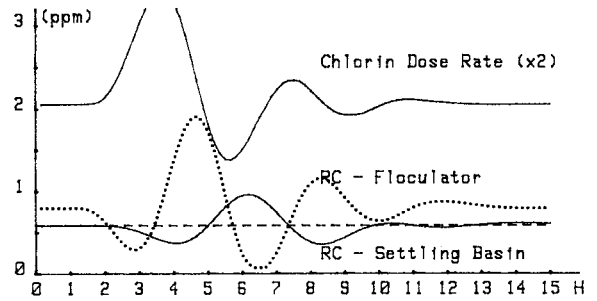


図 10. 適応制御の修正法

残留塩素濃度のクラス (目標値からのずれ%)、 D_{cc} (ppm/Hr)、 D_{cv} (ppm) との関係を表 1 にまとめて示した。沈殿水の残留塩素は 0.5 ppm 以上となった。

表 1. パラメータ (D_{cc}, D_{cv})

$\Delta RC(\%)$	D_{cc}	D_{cv}
15 <	0.3	-1.2
5 < < 15	0.3	-0.4
-5 < < 5	-	0
-15 < < -5	0.36	-0.2
< -15	0.4	-0.1

5. 結論

(1) 原水の塩素要求量の成分のうち反応速度の低い第 2 種および第 3 種の塩素要求量物質の組成比率の高い外乱が予想される浄水場では、検水の取水点はフロック形成池出口に近いほうが良い。

(2) 塩素の注入点から 10 ~ 20 分程度の遅れ時間を有する急速混和池出口水の検水取水では、標準形 P I 制御よりも、塩素消失量推定による適応制御のほうが若干良い。

(3) 応答遅れの長いフロック形成池出口での検水取水には、ステップ的に注入する改良形 P I 制御で十分に制御が出来る。

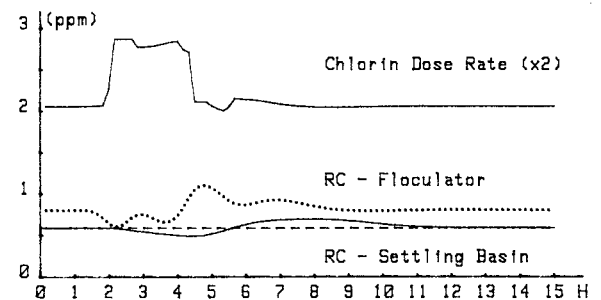


図 11. 改良形 P I 制御