

浄水場の水質シミュレーションモデル

関東芝重電技術研究所 ○栗原 潮子 三浦 良輔

1. はじめに

近年、浄水処理法として、アルミニウム塩による薬品沈澱急速ろ過、苛性ソーダによるPH調整、および塩素による殺菌が一般的になってきている。これらの薬品注入制御におけるガイダンスの実行や制御の自動化にあたっては、機場ごとに異なるプラント特性を正確に把握し、制御方法を事前に十分検討しておく必要がある。その検討を行う手段として、演者らは、プラントモデルブロックと制御モデルブロックとから構成される浄水場シミュレータを作成した(図1)。ここではプラントモデルブロックについての報告を行う。

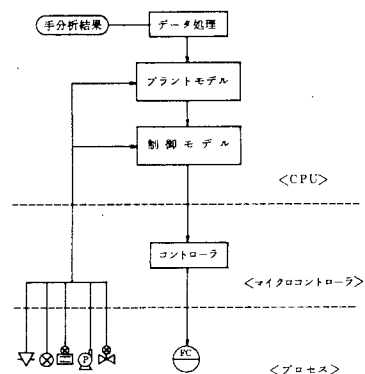


図1 浄水場シミュレータ概略図

2. プラントモデル設計諸元

プラントモデルは、土木図面、水質計器と薬品注入の計装フローシート、および現地調査をもとに、以下の7つのサブモデル(動力学モデル)を組合せて、各機場ごとに作成した。この動力学モデルによって、浄水場各プロセスにおける水質(残留塩素、全炭酸、アルカリ度、塩素要求量、次亜塩素酸イオン、PH、水温、濁度)の変化が計算される。

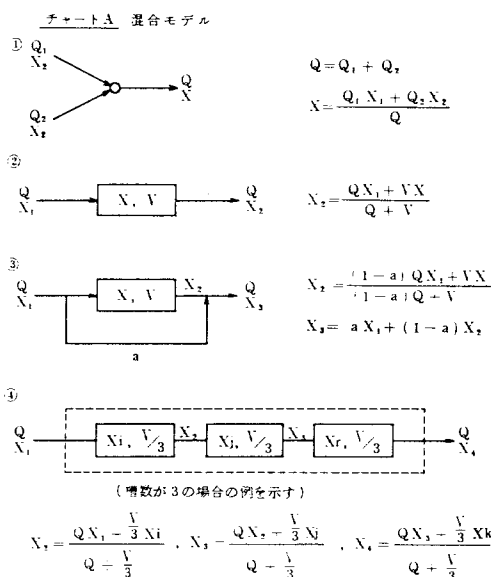
2.1 混合モデル

浄水場の各池に流入した時点でおこる混合をモデル化したものである。基本的には次の4種類があり、実際のモデルでは、これらを組合せて用いた(チャートA)。

- ① 点混合 ……管路の合流や薬注の場合。
- ② 完全混合 ……押出流が小さく、滞留時間も小さい池の場合(例:着水井)。
- ③ 短絡混合 ……混合が不完全のまま池から流出する場合(例:沈澱池、浄水池)。
- ④ 槽列混合 ……押出流が大きい場合(例:フロック形成池、沈澱池、浄水池)。

2.2 炭酸塩一次亜塩素酸塩システム

残塩、全炭酸、アルカリ度、PHの4水質は、このうちのいずれか3つの値が既知であれば、残り1つの値は計算で求めることができる(チャートB)。PH



Q: 流量, X: 水質, $0 < a < 1$ 短絡係数とする。

チャートB 炭酸塩一次亜塩素酸塩システム

定義より $\text{PH} = -\log \{ \text{H}^+ \}$

$$A = C (\beta + 2\gamma) + \{ \text{OH}^- \} - \{ \text{H}^+ \} + \{ \text{ClO}^- \}$$

$$C = \{ \text{H}_2\text{CO}_3 \} + \{ \text{HCO}_3^- \} + \{ \text{CO}_3^{2-} \}$$

$$K_1 = \frac{\{ \text{H}^+ \} \{ \text{HCO}_3^- \}}{\{ \text{H}_2\text{CO}_3 \}} = \frac{\beta}{\alpha} \{ \text{H}^+ \}$$

$$K_2 = \frac{\{ \text{H}^+ \} \{ \text{CO}_3^{2-} \}}{\{ \text{HCO}_3^- \}} = \frac{\gamma}{\beta} \{ \text{H}^+ \}$$

$$K_c = \frac{\{ \text{H}^+ \} \{ \text{ClO}^- \}}{\{ \text{HCLO} \}}$$

$$K_w = \{ \text{H}^+ \} \{ \text{OH}^- \}$$

K_1, K_2, K_c, K_w が水温の関数として求まっていれば、未知の水質の値はこれらの関係式より計算できる。

A: アルカリ度, C: 全炭酸, α : $\{ \text{H}_2\text{CO}_3 \}$ のモル分率
 β : $\{ \text{HCO}_3^- \}$ のモル分率, γ : $\{ \text{CO}_3^{2-} \}$ のモル分率

は、混合モデルによって混合後の値を計算できないため、このモデルで、他の3水質の混合後の値から計算する。

2.3 塩素消失モデル

2.3.1 塩素要求物質による消失

注入された塩素が塩素消費物質によって消失することをモデル化したものである。塩素要求物質としては、反応のしやすさに応じて3種類を考えた。第1種塩素消費物質には、 NH_4^+ 、アミノ酸、 Fe^{2+} を、第2種塩素消費物質には、 Mn^{2+} 、有機物、結合塩素を、第3種塩素消費物質には、有機物、高分子化合物を想定し、これら3種の和を塩素要求量とした。又、遊離塩素分解物は水素イオンのみで、3種類の物質による消失速度は残留塩素によって律速されるものとした。

2.3.2 ろ過池における塩素消失

ろ過池における塩素消失は、プラントの特性によって選択できるよう、次の4種類を考えた。

- ① ろ過構造物との接触反応。塩素は塩素消費物質とは反応せず、ろ過砂等との接触で分解する場合。
- ② ろ材により、塩素消費物質との反応が促進される場合。
- ③ 3種類の塩素消費物質がろ滓へ捕捉され、それらが塩素と反応する場合。
- ④ ろ過池において残留塩素が一定の比率で消失する場合。

2.3.3 検水の導水中における塩素消失

水質を測定する水質計器は、普通池から離れたところにあるため、検水の導水中に塩素の消失がおこる。これを時間の関数として記述した。

2.4 気象モデル

滞留時間の大きい沈澱池においては、塩素は日射による分解および風による飛散を受け、消失する。この消失量をプラントに設置した日射量計と風速計、および該当池のPH、水温、次亜塩素酸濃度、反応時間から推定するモデルである。

2.5 凝集モデル

急速攪拌池において、原水に含まれる濁度成分はPACと反応し、マイクロフロックを生成する。このマイクロフロックはフロック形成池において生長・破壊をくり返す。以上の過程をモデル化したものである。生成するマイクロフロックの個数濃度、体積、比重は以下の仮定より計算を行った。

- ① 原水濁度成分は、半径、比重のわかった球である。
- ② PACの加水分解生成物は $\text{Al}_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ で、比重は既知である。
- ③ PACの加水分解生成物は濁度成分をコーティングし、球形である。

さらに、生成したマイクロフロックのフロック形成池における生長・破壊においては、以下の項目を前提としている。

- ① マイクロフロック10個が合体して最小フロックとなる。
- ② 最小フロックは逐次10個ずつ合体して大きくなる。
- ③ ①と②の合体において、フロックは間隙水を包蔵していく。
- ④ 最小フロックが破壊すると10個の小フロックに分解する。
- ⑤ k番目の大きさのフロックが(k+1)番目の大きさに成長する速度は、粒子の半径、粒子数、攪拌、履歴、温度、最適PAC注入率からのずれ、最適PHからのずれによる7つの効果で律速される。
- ⑥ (k+1)番目の大きさのフロックがk番目の大きさのフロックに破壊する速度は、粒子半径、攪拌、履歴による3つの効果で律速される(このフロックの大きさのクラスを級ということにする)。

これらの仮定から、フロック形成池より流出するフロックの個数、体積、比重を計算した。

2.6 沈澱池モデル

限界沈降速度と、粒子の沈降確率を加味したモデルで、以下の項目を前提とした(チャートC)。

- ① 短絡流があるため、池面積の修正をする。
- ② フロック粒子には、正規分布に従う沈降確率がある。

従って、沈澱池より流出するフロック粒子数は、フロック形成池出口の粒子数にこの確率を乗じた値となる。フロックの沈降速度は、水の動粘性係数、フロック形成池出口の比重と半径とから計算を行う。

2.7 ろ過モデル

沈澱池をキャリアオーバーしたフロックが砂ろ過によって除去され、ろ過池の損失水頭が上昇することをモデル化したものである。同様に前提条件を以下に示す。

- ① フロックは、当初水路の無効空隙へ捕捉されるが、このとき損失水頭は生じない。
- ② 有効ろ過空隙に捕捉されたフロック量の増加とともに水頭の損失が生じる。
- ③ フロックの捕捉率、離脱率はPHに依存する。
- ④ 水路閉塞によって有効ろ過容積が増加するように、空隙率を補正する。

以上の仮定から計算した空隙率を用いて、Fair-Hatch 式または Kozeny-Carman 式より損失水頭を算出する(チャートD)。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション内容

以上述べてきたような構成をもつプラントモデルを作成し、その動特性を、以下の4項目について調べた。

- ① 前塩素注入率のステップ応答
- ② 前苛性注入率のステップ応答
- ③ PAC注入率のステップ応答
- ④ 原水塩素要求量変化に対する応答

実験は定常状態から開始し、薬品注入率はステップ応答をとるもの以外は一定値として行った。

3.2 結果・考察

- ① 前塩素ステップ応答を図2に示す。
- ② 前苛性ステップ応答を図3に、またそのときのフロックの大きさに対する濁度を図4に示す。
- ③ PACステップ応答を行ったときの濁度変化を図5に、フロックの大きさに対する濁度変化を図6に、浄水工程各点の濁度変化を図7に示す。
- ④ 原水塩素要求量変化に対する残留塩素を図8に

チャートC 沈澱池モデル

i番目の大きさのフロック沈降確率: $P_{\omega i}$

$$P_{\omega i} = \exp \{-a(b - \log V_i)^2\} \leq 1$$

$$V_i \geq V_m \text{ のとき, } P_{\omega i} = 1$$

V_i : i番目の大きさのフロック沈降速度

V_m : 定数(限界沈降速度よりも大きな値をもつ)

a, b: 定数

チャートD ろ過池モデル

$$E = \frac{Q_{rf} - V_{orx}}{V_{orf} - V_{orx}}$$

$$E_{rf} = E_0 \cdot (1 - E)$$

$$H_f = \frac{k \cdot L_r \cdot (1 - E_{rf})^2 \cdot V_v}{(Y_r \cdot D_r)^2 \cdot E_{rf}^3 \cdot g} \dots \dots \dots (\text{Kozeny-Carman 式})$$

$$H_f = k' \cdot \frac{C_D}{g} \cdot \frac{V_v^2}{E_{rf}^4} \cdot \frac{L_r \cdot A}{D_r'} \dots \dots \dots (\text{Fair-Hatch 式})$$

Q_{rf} : 捕捉フロック量

Y_r : 形状係数

V_{orx} : ろ過容積

D_r : 砂の直径

V_{orf} : ろ過体積

V_v : 空塔速度

E_{rf} : 空隙率

A: 砂の α/β 比

E: 充てん率

D_r' : 砂の調和平均径

L_r : 砂層厚

g: 重力加速度

k, k', E_0 : 定数

C_D : 抵抗係数 (Re: レイノルズ数)

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{rRe} + 0.34$$

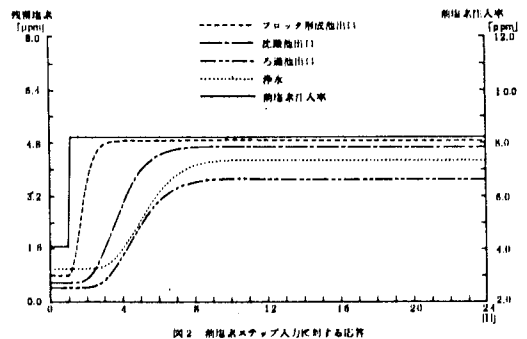


図2 前塩素ステップ注入率に対する応答

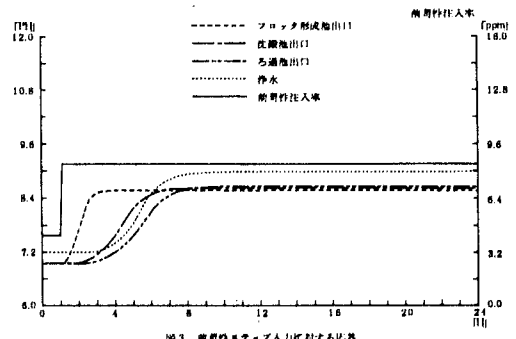


図3 前苛性ステップ注入率に対する応答

表1 (単位:分)

	整定時間*	遅れ時間*	立上り時間*	流速時間
フロッチ形成池	100 110	39 54	76 77	15
沈殿池出口	302 315	155 195	187 181	179
ろ過池出口	392 395	213 260	220 205	270
塩素混合池	385 365	215 178	222 181	280
浄水	415 395	242 256	229 186	435

* 上段は前塩素ステップ入力, 下段は前苛性ステップ入力に対する値

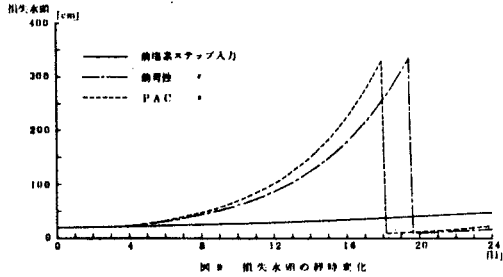


図8 損失水頭の経時変化

示す。

- ⑤ 前塩素, 前苛性, PAC注入率ステップ応答を行ったときの損失水頭変化を図9に示す。

図2と図3の場合について, 立上り時間, 遅れ時間, 整定時間, および前塩素・前苛性注入点からの水理学的流達時間を比較した(表1)。いずれの値も下流になるに従って, 水理学的流達時間に近い値になっているが, これは, 下流になるほど押出流が大きくなることを考慮すると, 妥当であると思われる。また, これらステップ応答の結果から, 当モデルが実際の浄水場のものとほぼ同じであることがわかった。

4. 結論

- (1) 浄水場シミュレータのプラントモデル部分が完成した。このプラントモデルブロックに, 制御モデルブロックを組込めば, 制御方法の事前検討ができるようになる。また, 新しい制御方法の開発にも, 利用できよう。さらに, 実機場にこのプラントモデルと制御モデルを組込んで, 薬品注入制御のガイダンスに供したり, 水質計器の診断を行ったりすることも可能になる。

- (2) 今後の課題として

- ① 実機場データの収集
- ② プラントモデルのパラメータ決定
- ③ 必要が生じた場合には, プラントモデル自体の修正

を行い, 機場データに適合させていきたい。

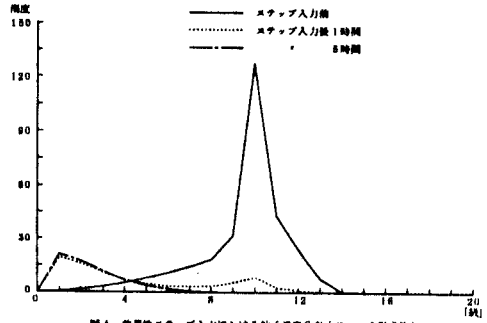


図4 前苛性ステップ入力における投じ濃度分布(フロッチ形成池)

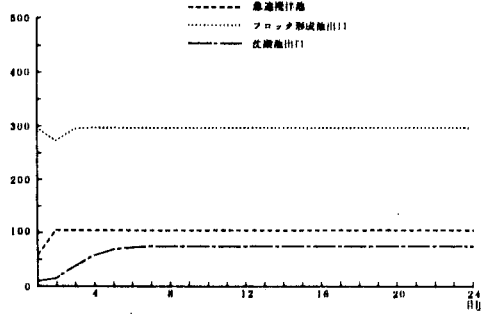


図5 PACステップ入力に対する濃度の応答

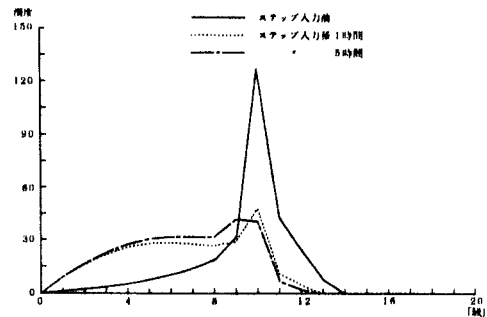


図6 PACステップ入力における投じ濃度分布(フロッチ形成池)

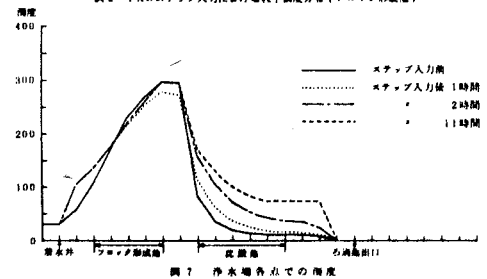


図7 浄水場各点での濃度

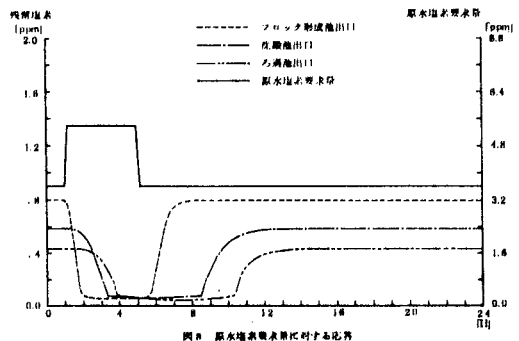


図8 原水塩素濃度に対する応答