

## 〈研究発表〉

# 急速ろ過プロセスにおけるろ過水濁度とろ過池損失水頭の同時推定に関する検討

村山 清一<sup>1)</sup>, 大澤 俊<sup>1)</sup>, 山原 裕之<sup>1)</sup>  
毛 受 卓<sup>1)</sup>, 横山 雄<sup>2)</sup>, 金谷 道昭<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター  
(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail:seiichi.murayama@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部  
(〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀河町72-34)

### 概要

急速ろ過方式の浄水場のろ過池におけるろ過水濁度とろ過池損失水頭を推定するモデル構築を進めている。ろ過池では、流入水質や運転条件に応じて懸濁物質の捕捉量が変化し、その結果がろ過水濁度及びろ過池損失水頭に現れる。ろ層を複数に分割し、ろ層ごとに適切なろ過係数が異なりと仮定し、各ろ層での懸濁物質の除去量を計算する。ろ層ごとのろ過係数はモデル内で演算可能で、各ろ層での懸濁物質の除去量からろ過水濁度及び損失水頭を算出する。モデルで算出したろ過水濁度と損失水頭の両方が実験データと良い一致を示したので報告する。

キーワード：急速ろ過、濁度、損失水頭、モデル、推定

原稿受付 2024.7.16

EICA: 29(2・3) 119-122

## 1. はじめに

急速ろ過方式を採用している浄水場では、凝集沈澱処理で原水中の懸濁物質の大部分を沈澱分離し、後段のろ過池で残った懸濁成分を除去している。凝集沈澱処理で確実に除去し、後段のろ過池への負荷を減らして安全側の運用をするケースが一般的であるが<sup>1)</sup>、これはろ過池に余力を残した状態で運用していることを示している。ろ過池に流入する水量・濁度などの変化に応じたろ過池の処理能力をモデルにより演算することができれば、良好なる過処理水質を保つろ過池流入水の水質条件を算出することができ、凝集沈澱処理の負荷を軽減できる可能性がある。その結果、凝集沈澱からろ過プロセスを通して処理水質を管理基準以下に維持しつつ凝集剤注入量を低減した最適運用やろ過池の洗浄タイミングの適正化が期待できる。このような背景のもと、急速ろ過方式の浄水場の凝集沈澱からろ過プロセスの最適化に向け、流入水質とろ過流量などの運転条件からろ過水濁度、およびろ過池の損失水頭を推定するろ過プロセスモデルの開発を進めている。

筆者らはろ過池の最適運用に向けたモデル化のためには、ろ過水濁度と損失水頭の推定が重要であると考えており、各々の推定について個別に検討してきた<sup>3,4)</sup>。ろ過水濁度の推定については、ろ過池への供給水中の微小な懸濁成分と僅かに残った凝集剤成分がろ過池での濁質除去性能を向上させる<sup>2)</sup>ことに着目し、ろ過池への供給水の凝集剤由来のAI濃度を用い、ろ層を複数に分割して濁度除去の性能に関わるろ過係数

λをろ層ごとに変化させることでろ過水濁度の推定精度の向上が可能なることを報告した<sup>3)</sup>。損失水頭の推定については、ろ過により蓄積する懸濁成分の影響をろ層ごとに算出して損失水頭を推定するモデルを構築した。各ろ層の出口濁度、ならびにろ過池への供給水の凝集剤由来のAI濃度を考慮することで損失水頭の推定値が検証実験結果を概ね再現できることを報告した<sup>4)</sup>。

本報では、ろ過水濁度、及び損失水頭を同時に推定するモデルを立案し、ろ過継続時間とともに変化するろ過水濁度と損失水頭の推定値の精度を検証実験により評価した結果について報告する。

## 2. ろ過プロセスモデル

### 2.1 モデルの概要

ろ過プロセスモデルは、ろ過水濁度を推定するモデル(以下、ろ過濁度モデル<sup>3)</sup>とする)と、ろ過池の損失水頭を推定するモデル(以下、損失水頭モデル<sup>4)</sup>とする)で構成される。ろ過濁度モデルの出力であるろ過水濁度からろ過池のろ層に蓄積される濁質量を演算し、設定した演算間隔の間に変化するろ層の空隙率εを算出する。そして、算出した空隙率εの変化から損失水頭モデルにより損失水頭を演算する。

### 2.2 ろ過濁度モデル<sup>3)</sup>

ろ層を複数に分割してろ層ごとにろ過係数λ<sub>(i)</sub>を設定し、(式1)に示すろ過方程式に従ってろ過水濁度

を算出する。

$$\frac{dC_{(i)}}{dz_{(i)}} = -\lambda_{(i)} \cdot C_{(i)} \quad \dots \text{(式1)}$$

ここで、 $C_{(i)}$ : 上から  $i$  番目のろ層出口の濁度 (度),  $z_{(i)}$ : 上から  $i$  番目の層のろ層厚 (m),  $\lambda_{(i)}$ : 上から  $i$  番目のろ層のろ過係数 (1/m) である。

ろ層の分割は、検証実験における採水位置に合わせた。ろ層上部での変化が大きいと推測し、最上層は層厚を小さく 10 cm, 最下層は製作上の理由で層厚 10 cm, 間は 20 cm ずつ 3 層とした合計 5 層とした。急速ろ過では、ろ過池への流入水中の懸濁成分に凝集剤成分も僅かに含まれており、ろ層の上層で濁質除去と損失水頭上昇が進みやすい<sup>3)</sup>ことから、下層に流れるにつれて濁質除去量に応じてろ過係数  $\lambda$  が小さくなることを考えた。ろ過池への流入水の濁度を  $C_{in}$  とすると、 $\lambda_{(i)}$  は (式 2) で計算できると仮定した ( $i \neq 1$ )。これにより、 $\lambda_{(1)}$  が決まれば  $\lambda_{(2)} \sim \lambda_{(5)}$  は (式 2) により算出できる。

$$\lambda_{(i)} = \frac{C_{(i-1)}}{C_{in}} \cdot \lambda_{(1)} \quad \dots \text{(式2)}$$

### 2.3 損失水頭モデル<sup>4)</sup>

層流状態における充填層の圧力損失を示す Kozeny-Carman の式<sup>2)</sup> ((式 3) に示す) を各ろ層に適用してろ層ごとに損失水頭を算出し、合計をろ層全体の損失水頭として算出する ((式 4))。ろ層ごとに空隙率  $\varepsilon_{(i)}$  を設定し、ろ過の時間経過とともに変化する変数とした。各ろ層の空隙率  $\varepsilon_{(i)}$  の算出式を (式 5) に示す。

$$\frac{\Delta P_{(i)}}{z_{(i)}} = \frac{180U\mu}{\phi_s^2 D^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon_{(i)})^2}{\varepsilon_{(i)}^3} \cdot \frac{10.2}{1000} \quad \dots \text{(式3)}$$

$$\Delta P = \Delta P_{(1)} + \Delta P_{(2)} + \Delta P_{(3)} + \Delta P_{(4)} + \Delta P_{(5)} \quad \dots \text{(式4)}$$

$$\varepsilon_{(i)} = \varepsilon_0 - \left( A \cdot (C_{in(i)} - C_{(i)}) + B \cdot \frac{C_{in(i)} - C_{(i)}}{C_{in}} \cdot PACl \right) \cdot \frac{U \cdot t}{z_{(i)}} \quad \dots \text{(式5)}$$

ここで、 $\Delta P$ : ろ層全体の損失水頭 (cmH<sub>2</sub>O),  $\Delta P_{(i)}$ : 上から  $i$  番目のろ層の損失水頭 (cmH<sub>2</sub>O),  $\phi_s$ : ろ過砂の球形度 (-),  $\varepsilon_{(i)}$ : 上から  $i$  番目のろ層の空隙率,  $D$ : ろ過砂の粒子径 (等積球相当径) (m),  $U$ : ろ過速度 (m/s),  $\mu$ : 沈澱水の粘性係数 (Pa·s),  $\varepsilon_0$ : ろ過開始時のろ層の空隙率 (全層で同じ値), PACl: 模擬沈澱水 1 L あたりに添加する凝集剤の添加量 (mg/L),  $C_{in(i)}$ : 上から  $i$  番目の層への流入水の濁度 (度) ( $=C_{(i-1)}$ ),  $t$ : ろ過時間 (s),  $A$ : 蓄積する濁度の体積変換係数 (-),  $B$ : 蓄積する凝集剤成分の量の体積変換係数 (-) である。

## 3. 検証実験方法

ろ過プロセスモデル評価のためにろ過塔を用いた検証実験を行った。Fig. 1 に砂ろ過検証実験装置のフロー図を示す。ろ過塔は内径 10 cm の透明塩ビ製で、重力式下向流方式で通水ろ過する。有効径 0.6 mm, 均等係数 1.4 以下の水道用ろ過砂 (JWWA A 103: 2006-2 適合品) を用い、ろ層厚は 80 cm とした。ろ過塔への供給水には、凝集沈澱プロセスの沈澱水を模擬してカオリン懸濁水に PACl を所定量添加したものをを用いた (以降、模擬沈澱水とする)。実験中は、模擬沈澱水、ろ過処理水、その他、Fig. 1 に示す採水箇所から定期的に採水し、濁度、損失水頭を測定した。濁度測定は、日本電色製 WA-6000 にてポリスチレンラテックス基準の濁度を測定した。採水箇所と同じ位置に U 字管マノメータを設置し、各ろ層の損失水頭を目視で記録した。急速ろ過を対象としているため、実験条件は、ろ過流速 100, 150, 200 m/日, 模擬沈澱水濁度は実浄水場の沈澱水相当として 1 度, 模擬沈澱水 1 L あたりに添加する PACl の量 (以下、PACl 添加量とする) は沈澱水中に残る凝集剤成分の量を想定し、0.25, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 mg/L を設定した。今回の実験の通水時間は 360~420 分とした。

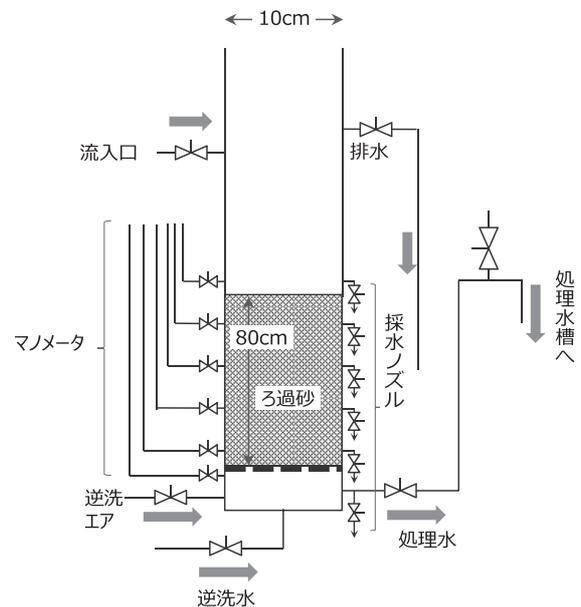


Fig. 1 Sand filtration evaluation system flow diagram

## 4. 結果

### 4.1 検証実験結果

Fig. 2 に各 PACl の添加条件におけるろ層深さとその深さでの濁度の関係を示す。凡例は、実験条件を“PACl 添加量/ろ過流速”として示した。通水実験中

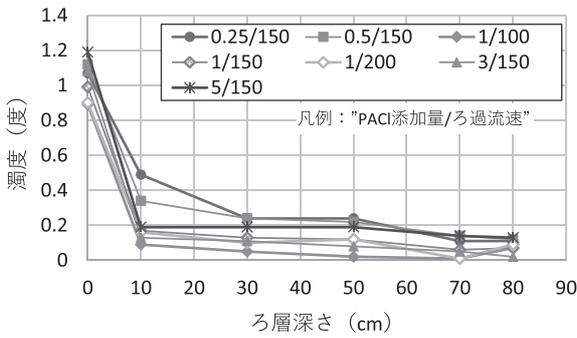


Fig. 2 Filtration water turbidity experimental data according to filter layer depth

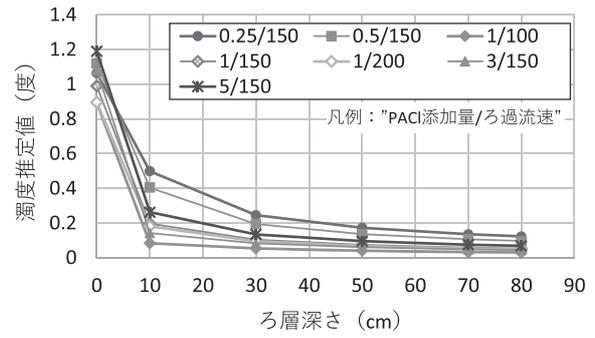


Fig. 4 model outputs of Filtration water turbidity according to filter layer depth

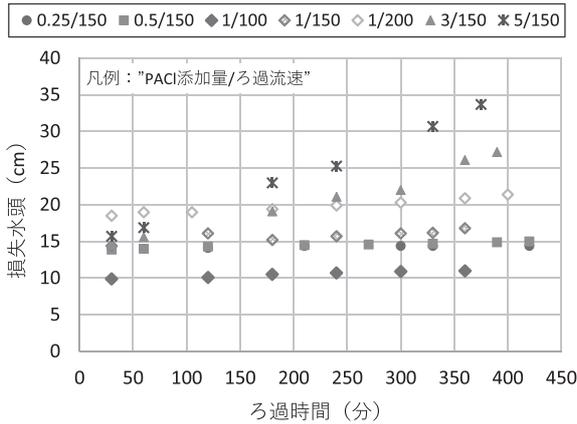


Fig. 3 Head loss experimental data of total filtration layer

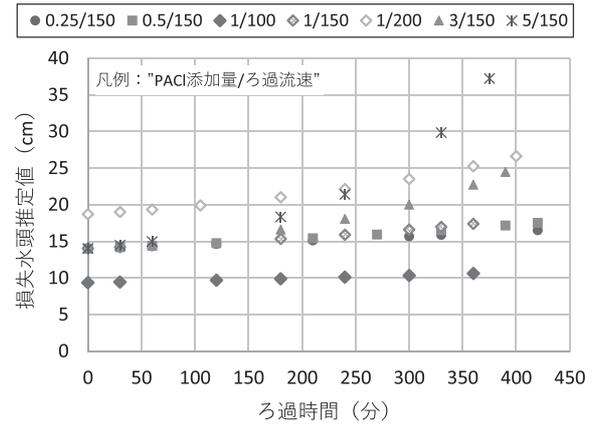


Fig. 5 model outputs of Head loss of total filtration layer

の濁度の時間変化はほとんどなかったため平均値を示した。どの条件でもろ層上層 10 cm で濁度は大きく減少し、その後ろ層深さが増すと濁度は横ばいか僅かに減少する傾向を示した。同じろ過流速 (150 m/日) では、PACI の添加量が少ない条件では、0.25, 0.5, 1.0 mg/L と添加量が多くなるほどろ層上層 10 cm での濁度の減少量は明らかに大きくなり、1.0 mg/L 以降ではほぼ同等となった。同じ PACI の添加条件 (1.0 mg/L) ではろ過流速が小さい方が濁度の減少量は大きくなった。

Fig. 3 に各条件におけるろ層全体の損失水頭の時間変化を示す。凡例は Fig. 2 と同じとした。損失水頭は時間と共に増加し、同じろ過流速 (150 m/日) では PACI の添加量が高い条件ほどその上昇率は高く、同じ PACI 添加条件 (1.0 mg/L) ではろ過流速が高いほど損失水頭そのものの値が大きく、上昇率も高くなった。

## 4.2 ろ過プロセスモデルの演算結果

### (1) ろ過濁度モデル演算結果

Fig. 2 に示したろ層内 4 箇所の濁度とろ過水濁度について、ろ過濁度モデルによる計算結果と実験結果の 2 乗平均誤差の合計が最小となるように各条件ごとに  $\lambda_0$  を決定する。決定した  $\lambda_0$  を用いて、全条件のろ過濁度モデル演算を行った。Fig. 4 にろ層深さとその深

さでのろ過水濁度推定値の関係を示す。ろ層上層 10 cm で濁度が大きく減少する点、同じろ過流速 (150 m/日) では、PACI の添加量が 0.25, 0.5, 1.0 mg/L と多くなるほどろ層上層 10 cm での濁度の減少量が大きくなる点、同じ PACI の添加条件 (1.0 mg/L) ではろ過流速が小さい方が濁度の減少量は大きい点など、検証実験と同様の傾向を示した。

### (2) 損失水頭モデル演算結果

(式 5) の係数 A, B をすべての条件で共通の係数として決定する。(式 3) の係数は、過去の検討<sup>3)</sup> を参考にろ過砂の球形度  $\Phi_s=0.77$ , ろ過砂の粒子径  $D=0.0006$  (m), 模擬沈澱水の粘性係数  $\mu=0.001002$  (Pa·s) (水 (20℃)) とし、実験中にほとんど変化しないため固定値とした。(式 5) の係数  $\epsilon_0$  は検証実験のろ過開始時の損失水頭 (14.0 cmH<sub>2</sub>O) となるよう 0.56 とし、 $C_{in(i)}$ ,  $C_{(i)}$  は Fig. 2 に示す検証実験データ、係数 PACI には検証実験の PACI 添加量を用いる。Fig. 3 の検証実験の損失水頭データのうち、ろ過流速が 150 m/日の全データ (PACI 添加条件の全ての時間のデータ) を用い、(式 1)~(式 5) で算出した損失水頭の差の 2 乗和が最小となるような組合せとして、 $A=0.025$ ,  $B=0.0092$  と決定した。決定した係数 A, B を用い、(式 1)~(式 5) により損失水頭を推定した結果を Fig. 5 に示す。係数 A, B の決定に使用しなかった検証実験の条件、即ち PACI 添加量が 1.0

mg/Lでろ過流速を100 m/日、200 m/日とした場合についても示した。PAClの添加量が多いほど損失水頭上昇率が高い点、同じPACl添加条件(1.0 mg/L)ではろ過流速が多いほど損失水頭が大きく、上昇率も高い点など、検証実験と同様の傾向を示した。

## 5. 考 察

### 5.1 ろ過水濁度推定値の評価

Table 1にモデルの評価結果を示す。ろ過濁度モデルで算出したろ過水濁度推定値と検証実験結果の差をろ層ごとに比較評価した結果、平均0.03度、最大0.09度となった。検証実験結果を用いて第1層のろ過係数 $\lambda_{(1)}$ を算出しているが、PACl添加条件の違い、ろ過速度の違いを含む全条件における第1層～第5層の濁度推定値であることを考えると、妥当な精度であると考えられる。

Table 1 Summary of model outputs

PACl 添加量 (mg/L)	ろ過流速 (m/日)	ろ過係数 $\lambda_{(1)}$	ろ層濁度 差の最大 (度)	ろ層濁度 差の平均 (度)	損失水頭 差の最大 (cmH <sub>2</sub> O)	損失水頭 差の平均 (cmH <sub>2</sub> O)
0.25	150	0.076	0.07	0.02	2.1	0.9
0.5	150	0.102	0.08	0.05	2.5	1.2
1	100	0.237	0.04	0.02	0.6	0.5
1	150	0.162	0.05	0.02	0.8	0.4
1	200	0.160	0.05	0.03	5.2	2.3
3	150	0.203	0.03	0.02	3.4	2.1
5	150	0.151	0.09	0.07	4.7	2.7
全 体			0.09	0.03	5.2	1.4

### 5.2 ろ層の損失水頭推定値の評価

損失水頭については、全ての時間の検証実験結果と推定値の差を求め、検証実験の条件ごとに最大、平均を算出した。Table 1にモデルの評価結果として、算出した差の最大、平均を示す。差の最大は5.2 cmH<sub>2</sub>O、平均は1.4 cmH<sub>2</sub>Oとなった。PACl添加量が1.0 mg/Lの条件では、ろ過流速を100, 150, 200 m/日と変更した実験も実施したが、ろ過流速の違いを反映した結果を算出し、他の条件の場合と遜色のない精度を示した。

## 6. お わ り に

本報では、ろ過水濁度、及び損失水頭を同時に推定するモデルの構築と評価を行った。ろ過濁度モデルでは、ろ層を複数に分割し、濁度除去の性能に関わるろ過係数 $\lambda$ のうち第1層の係数 $\lambda_{(1)}$ のみを設定することで他のろ層の $\lambda_{(i)}$ をモデル内で算出し、ろ過水濁度の推定を行った。損失水頭モデルでは、ろ過濁度モデルで推定した濁度を用い、模擬沈澱水中の凝集剤成分量を加味することでろ層の空隙率変化を算出し、損失水頭を推定した。PACl添加条件の違いとろ過速度の違いを含む全条件を通じた評価の結果、濁度推定値は検証実験との差の最大が0.07度、損失水頭推定値は実証実験との差は最大が5.2 cmH<sub>2</sub>Oと十分な推定精度が得られたと考えている。ろ過水濁度と損失水頭を同時に推定し、共に検証実験結果を概ね再現できたと考えられる。今回は模擬原水での評価であったため、凝集沈澱処理水を用いた連続通水試験での評価、長時間運転の評価、異なる原水水質での評価を進め、適切な凝集剤注入率の決定やろ過池洗浄タイミングの決定を支援するアプリケーションへの適用を目指す。

## 参 考 文 献

- 1) 松井佳彦, 丹保憲仁: 急速ろ過プロセスの数式モデル, 水道協会雑誌, Vol. 61, No. 2, pp. 17-27 (1992)
- 2) 土木学会環境工学委員会環境工学に関わる出版準備小委員会: 環境工学公式・モデル・数値集, 土木学会, pp. 27-29 (2004)
- 3) 村山清一, 福田美意, 毛受卓, 横山雄, 金谷道昭, 黒川太: 急速ろ過プロセスにおけるろ過水濁度推定に関する検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 26, No. 2/3, pp. 16-19 (2021)
- 4) 村山清一, 大澤俊, 山原裕之, 毛受卓, 横山雄, 金谷道昭: 急速ろ過プロセスにおけるろ過池損失水頭推定に関する検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 27, No. 2/3, pp. 106-109 (2022)