

## 〈研究発表〉

# 浄水塩素注入最適化アプリケーションのモデル検証

毛 受 卓<sup>1)</sup>, 鷹 箸 幸 夫<sup>1)</sup>, 横 山 雄<sup>2)</sup>  
金 谷 道 昭<sup>2)</sup>, 松 本 隼<sup>3)</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番地 E-mail: :takashi.menju@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川町72-34 E-mail:suguru.yokoyama@toshiba.co.jp)

<sup>3)</sup>(株)東芝 NEXT ビジネス開発部

### 概 要

浄水場における塩素注入の自動化・最適化に向け、高精度な残留塩素濃度予測モデルを搭載した塩素注入最適化アプリケーションの開発を進めてきた。実フィールドにおいて実証試験を行い、アプリケーション適用による有用性の検証を完了した。本アプリケーションは、物理・化学反応に基づくホワイトボックスモデルと、AIによるブラックボックスモデルを組み合わせた残留塩素濃度予測モデルを演算エンジンとしているが、浄水場のオペレータにアプリケーションで演算した塩素注入率を安心して利用してもらうためには、演算結果に対する説明性が重要と考えている。そこで、演算エンジンの説明性を評価するため演算におけるホワイトボックスモデルの演算範囲をカバー率として評価したので報告する。

キーワード：浄水処理, 塩素処理, 残留塩素, 塩素消費, 予測モデル  
原稿受付 2023.7.6

EICA: 28(2・3) 56-59

## 1. は じ め に

浄水場において塩素の注入は、細菌の消毒、鉄やマンガンなどの酸化、有機物やアンモニアの分解、藻類の凝集性向上、配水中の衛生確保などを目的に行われている。塩素注入率は、オペレータが原水水質や天候、季節などから過去の知見や経験などに基づいて塩素消費量を見込み、管理ポイントにおける残留塩素濃度が管理目標値以下にならないよう、安全率を考慮して設定していることが多い。これが、オペレータの負荷増大といった課題となっている。そこで、この課題の解決を目的として塩素注入の自動化・最適化に向け、残留塩素濃度を予測するモデルに基づいて残留塩素濃度の管理目標値を維持する最適な塩素注入率を演算し、オペレータに提示するアプリケーションを開発してきた。このアプリケーションを浄水場の運転に適用し、実フィールドにおいて管理目標値への追従性を確認し有用性を検証した結果を報告した<sup>1)</sup>。浄水場のオペレータがアプリケーションの塩素注入率演算結果を安心して利用するには、演算結果に関する説明性が重要と考えており、本報ではホワイトボックスの各モデルの演算結果を分析し、演算結果に対する説明性を塩素消費量の実測値に対するホワイトボックスモデルの演算値の比であるカバー率で評価した結果を報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 実証試験概要

今回の実証試験では、前塩素に対する消費反応をモデルの検証対象とした。残留塩素濃度予測モデルは、塩素注入後の原水中の物質との反応時間や池での滞留時間に応じて塩素消費を演算するため、浄水プロセスの任意の点で残留塩素濃度の算出が可能である。そこで、塩素の注入点から管理ポイントまでの滞留時間が長く、紫外線の分解に関する検証も行える前塩素を選定した。沈澱池出口残留塩素濃度の管理目標値を0.1 mg/Lに設定し、アプリケーションの演算結果に基づき、0.85 mg/L前後の前塩素注入率で運転して、沈澱池出口残留塩素濃度が管理目標値に追従することを検証した。実証試験期間は、2022年11月16日の8:00~17:00である。

### 2.2 残留塩素濃度予測モデル検証

残留塩素濃度の予測値は、原水に含まれる塩素消費物質と紫外線量などから、式(1)より求められる<sup>2)</sup>。式(1)で塩素を消費する未解明の要因をその他としており、物理・化学反応に基づくホワイトボックスモデルによる残留塩素濃度の演算結果と実際の残留塩素濃度との差分から、ブラックボックスモデルで補完して

いる<sup>2)</sup>。

$$C_t = C_0 - f_1(C_{in}, t, T, \dots) - f_2(C_{on}, t, T, \dots) - f_3(UV, t, T, \dots) - f_4(\text{その他}) \quad (1)$$

$C_0$ : 初期塩素濃度 (mg/L),  $C_{in}$ : 無機物質濃度 (mg/L),  
 $C_{on}$ : 有機物質濃度 (mg/L),  $t$ : 滞留時間 (s),  $T$ : 水温 (K),  
 $UV$ : 紫外線量 ( $W/m^2$ ) ※  $n$ : 1~成分数

実証試験機場において、無機物質で主に塩素を消費するのはアンモニア性窒素、鉄(II)、マンガン(II)であることが、事前のモデル構築の際に確認されている。紫外線分解やこれまで未解明であったうち揮発放散に関しては、本実証機場における計測データよりモデル構築した<sup>3)</sup>。揮発放散に関しては、着水井から混和池への流下部における気泡巻き込みに起因する放散モデルを立案し、流量と残留塩素濃度より演算した。実証試験期間にこれら水質項目の分析や紫外線量測定を行い、式(1)で求めた残留塩素濃度予測値と実測値を比較することで、ホワイトボックスモデルで前塩素の分解をどの程度カバーできているかを評価した。カバー率  $R$  は、式(2)により算出した。

$$R = \frac{\text{ホワイトボックスモデル前塩素消費濃度演算値}}{\text{前塩素消費濃度実測値}} \quad (2)$$

ここで塩素消費濃度は、各塩素消費物質との反応により低下する塩素濃度を指す。前塩素消費濃度実測値は、前塩素注入率と滞留時間後の沈澱池出口残留塩素濃度との差である。

### 2.3 塩素消費要因の把握

実証試験中は、定期的に浄水プロセスの各サンプリングポイントから採水し、塩素消費反応に関わる水質項目として溶解性鉄、溶解性マンガン、アンモニア性窒素、TOC (全有機体炭素 Total Organic Carbon の略、以下 TOC と表記)、および残留塩素濃度の分析を行った。サンプリングポイントは、原水、フロック形成池入口水、沈澱池入口水、沈澱池出口水、ろ過水とし、フロック形成池のみ現場で採水し、その他は水質計器室に送られてきた水を採水した。採水のタイミングは、原水サンプルを採水した時刻を起点として、処理量と浄水プロセスの各池の容積から滞留時間を算出し、滞留時間の経過に合わせて各ポイントで採水し原水サンプルを追尾するように調節した。溶解性鉄、溶解性マンガン、アンモニア性窒素はサンプルを粒子保持能  $1.2 \mu m$  のガラス繊維ろ紙でろ過後、JIS K 0102 57.4, JIS K 0102 56.4, JIS K 0102 42.5 に準じて分析した。TOC は水道水質検査の公定法に準じて分析した。残留塩素濃度は、携帯型デジタル式 DPD 残留塩素測定器を用いて測定した。紫外線強度は、B 領域紫

外放射計をろ過池制御室屋上に設置して連続測定し、これを塩素分解に寄与する紫外線量に換算した。

## 3. 結果

### 3.1 各水質項目および紫外線量の分析結果

Fig. 1 に、採水分析によって浄水プロセス内での塩素消費物質の変化を評価した結果を示す。前塩素注入後、溶解性鉄は速やかに酸化されて凝集沈澱で除去され、溶解性マンガンは緩やかに酸化されてろ過池で除去されていることがわかる。また、TOC は前塩素とは反応したと考えるが、濃度はほとんど変化しなかった。アンモニア性窒素は実証試験期間では検出限界以下であった。次に、実証を行った日の B 領域紫外線強度の測定結果を Fig. 2 に示す。多少雲により紫外線が遮られる時間帯もあったが、晴天で紫外線がフロック形成池や沈澱池の水面に照射される状況であったことが判る。

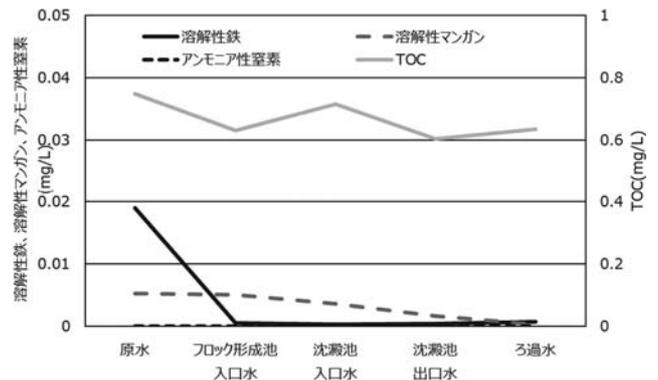


Fig. 1 Concentration changes of chlorine consuming substances in the water purification process

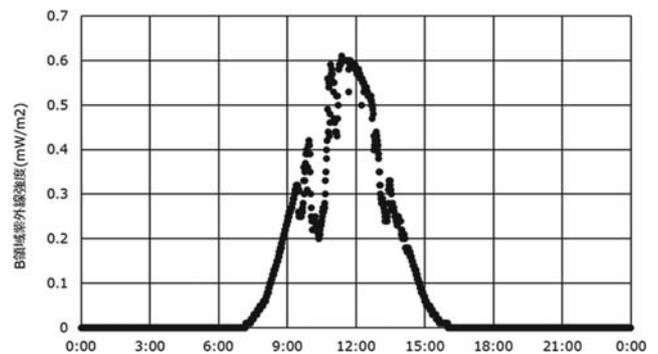


Fig. 2 Change for the elapsed time of UV intensity

### 3.2 前塩素消費の演算結果

紫外線による分解に関しても確認するため、紫外線が照射される時間帯に沈澱池を通過する、10:00に着水井に流入した原水に対して、注入された前塩素の注入率とホワイトボックスモデルで演算した塩素消費を、濃度で比較した結果を Fig. 3 に示す。ホワイトボックスモデルで各塩素消費要因のうち、最も影響が大き

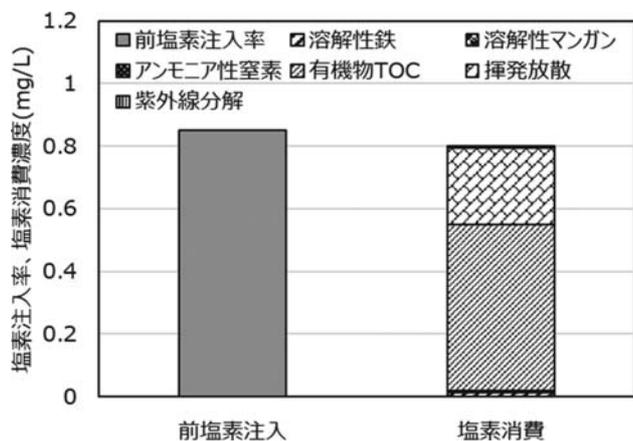


Fig. 3 Comparison of pre-chlorine dosage and calculation results of chlorine consumption concentration by the model

かったのは有機物との反応で、全体の64%を占める結果となった。また揮発放散による塩素の消失も30%を占め、本実証機場の秋季の原水水質が安定している定常時は、前塩素の消費は有機物との反応と揮発放散が支配的と考えることができる。また、前塩素注入率0.85 mg/Lに対してホワイトボックスモデルによる前塩素消費濃度演算値は0.799 mg/Lとなり、残留塩素濃度予測値は0.051 mg/Lとなった。滞留時間を考慮した16:08の沈澱池出口残留塩素濃度の実測値は0.049 mg/Lであることから前塩素消費濃度実測値は0.801 mg/Lとなり、前塩素の凝集沈澱池出口までの消費に関して、カバー率は0.998となり、ホワイトボックスモデルで塩素消費の減少についてほぼすべて説明できる結果となった。

## 4. 考察

### 4.1 夏季の紫外線分解量想定との比較

ホワイトボックスモデルによる紫外線分解は、実証を実施したのが秋季後半ということもあり、前塩素の分解にほとんど寄与しない結果となった。そこで、本実証機場において紫外線が強い夏季に、紫外線による

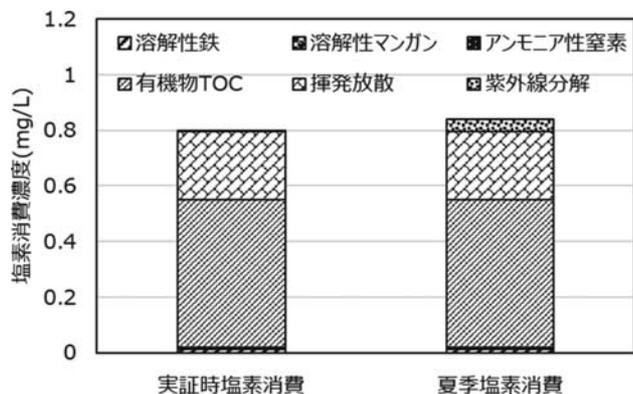


Fig. 4 Comparison of the amount of chlorine decomposed by UV degradation during verification test and in summer

塩素分解が全体に対してどの程度占めるか試算した。Fig. 4に示した試算結果は、Fig. 3の原水水質の塩素消費は同値として、紫外線分解のみ夏季の快晴時の紫外線量で演算した結果としてグラフ化したものである。有機物や揮発放散が大部分を占める状況は変わらないが、紫外線による塩素分解は0.05 mg/Lとなった。本実証機場で沈澱池出口残留塩素濃度の管理値を0.1 mg/Lとする場合には、夏季に紫外線による塩素分解を考慮して前塩素注入率を設定する必要があることを示している。

### 4.2 実測値とソフトセンシング値の比較と残留塩素濃度予測値

浄水場で連続計測している値からオンライン計測できていない塩素分解に関する水質項目の濃度を推定するソフトセンシングモデル<sup>4)</sup>について、実測値と比較検証した結果をFig. 5に示した。2時間おきにプロットしているデータが、採水分析結果である。溶解性鉄の実測値とソフトセンシング値が乖離しているが、TOC、溶解性マンガン、アンモニア性窒素は実測値とソフトセンシング値が比較的よく一致している。

ソフトセンシング値を用いて塩素消費要因の積算による残塩消費予測濃度の経時変化をFig. 6に示した。溶解性鉄濃度が低く塩素消費濃度が小さかったため、ソフトセンシング値と実測値との乖離は塩素消費全体

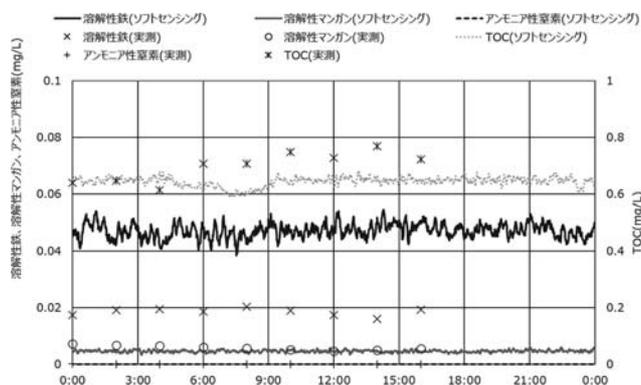


Fig. 5 Comparison of soft sensing values and measured values

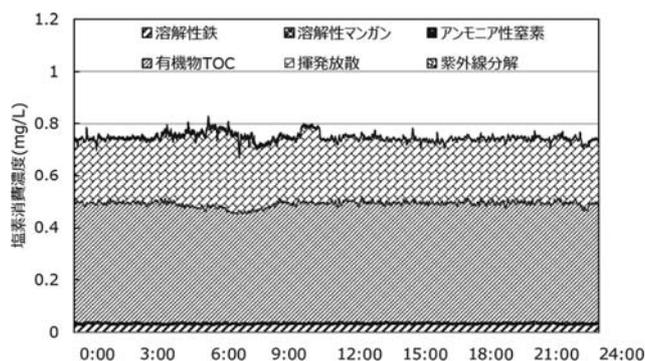


Fig. 6 Change for elapsed time of predicted residual chlorine consumption based on soft sensing values

には影響せず、積算値は0.75 mg/L前後で推移した。沈澱池出口残留塩素濃度管理目標値0.1 mg/Lであり、塩素注入最適化アプリケーションではこの残塩消費予測に基づき前塩素注入率の最適注入率を0.85 mg/L前後と演算し運転していたことが判る。原水水質のソフトセンシング値に基づく前塩素消費濃度推定値は0.745 mg/Lとなり、この結果で式(2)よりカバー率を算出した結果0.930となった。

## 5. ま と め

塩素注入最適化アプリケーションの前塩素注入に関する実証試験において、水質分析や紫外線強度の測定結果などから残留塩素濃度予測モデルの検証を行った。原水中に含まれる塩素消費要因物質の濃度や紫外線量、揮発放散量を把握することで、ホワイトボックスモデルで前塩素が沈澱池出口までに消費される現象をほぼ説明できることを確認した。この結果より、説明性の高い残留塩素濃度予測モデルが構築できたと考えている。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人水道技術研究センター公募型実証研究支援事業(A-IDEA)の一環として行ったものである。実証試験にご協力いただいた、長野市上下水道局、および、水道技術センターの皆様へ感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 毛受ら, 塩素注入最適化アプリケーションの開発——実フィールドにおける検証, 令和5年度水道研究発表会, (2023)
- 2) 毛受ら, 塩素注入最適化アプリケーションの開発——塩素消費モデルの検討, 令和3年度水道研究発表会, pp.4-12 (2022)
- 3) 毛受ら, 浄水場における遊離残留塩素の紫外線分解に関する一考察, 環境システム計測制御学会, Vol.25, pp.99-104 (2020)
- 4) 松本ら, ランダムフォレストを用いた原水水質のリアルタイム推定, 環境システム計測制御学会, Vol.27, pp.85-89 (2022)