

〈研究発表〉

浄水場における落下水流による塩素消失に関する一考察

毛 受 卓¹⁾, 鷹 箸 幸 夫¹⁾, 横 山 雄²⁾, 金 谷 道 昭²⁾¹⁾ 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)²⁾ 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)

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。原水水質との化学反応や紫外線による分解反応などの物理反応に基づくホワイトボックスモデルの構築を進める過程で、浄水場において着水井の前塩素注入点から混和池出口に至る間において、それまで構築してきたホワイトボックスモデルで説明できない塩素消費が確認された。そこで、浄水場において残留塩素濃度の詳細なデータを収集し、不明な塩素の消失場所の特定とそのメカニズムについて考察したので報告する。

キーワード：浄水処理, 残留塩素, 塩素消費モデル, 落下水流

原稿受付 2024.8.9

EICA: 29(2・3) 107-110

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。状況に応じて塩素注入率を設定する作業が、オペレータの負荷増大の要因となっていた。そこで、この課題を解決する塩素注入の自動化・最適化に向け、原水水質との化学反応や紫外線による分解反応などの物理反応に基づくホワイトボックスモデル^{1,2)}とそれを補完す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用いて、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³⁾。実証現場においてモデルの検証やパラメータ調整を行ってきたが、着水井から混和池出口までの間で比較的大きな要因不明の塩素消失がありブラックボックスモデルで補完を行っていた。Fig. 1は前塩素注入率を100%として、急速混和池出口での残留塩素濃度とホワイトボックスモデル、ブラックボックスモデルにより演算した塩素消費濃度の比率を比較した例を示したグラフである。急速混和池出口では、ホワイトボックスで演算した以上に残留塩素が低下しており、ブラックボックスモデルによりホワイトボックスモデルで演算した値と同程度の濃度を補完し

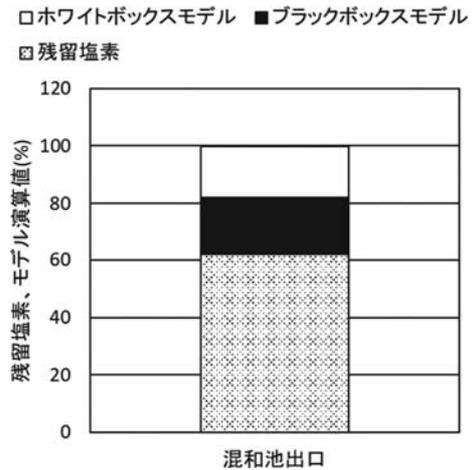


Fig. 1 Comparison of Chlorine Consumption by White box and Black box models

ているのが分かる。そこで残留塩素濃度予測モデルの精度および説明性向上を図るため、浄水場において調査を行い、不明な塩素消失箇所の特定制とその要因となる現象について考察したので報告する。

2. 現地調査及び水質分析

2.1 現地調査

着水井からフロック形成池までのフローを Fig. 2に示す。着水井から急速混和池までは一体型のRC槽であり、着水井から開渠を経て急速混和池に自然流下で流入している。着水井では、取水と排水池からの返送水が流入し、前塩素とアルカリ剤である苛性ソーダが注入されている。浄水場は河川敷の平坦な土地に作

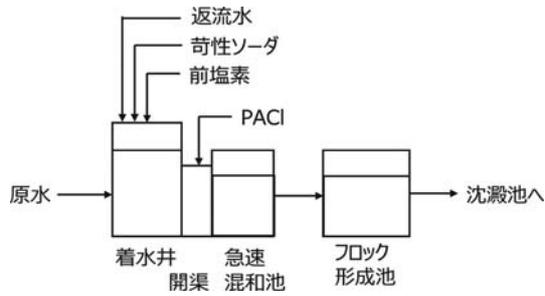


Fig. 2 Flow Diagram from Intake Tank to Flocculation Tank

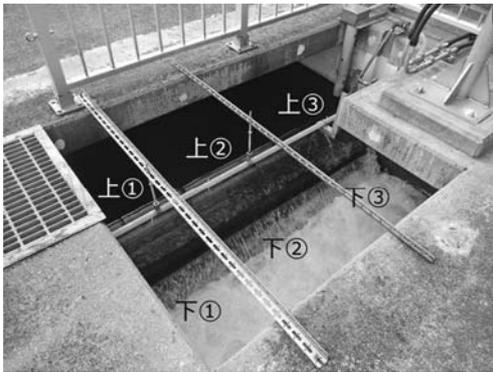


Photo. 1 Overflow Weir of the Intake Well and Open Channel

られているため、着水井は地上型で水位を高くとれるように設計されている。凝集剤である PACI は、着水井と急速混和池を繋ぐ開渠で注入されており、急速混和池のフラッシュミキサで混合されている。着水井は上部が半分コンクリート製の天蓋で覆われているが、着水井の越流堰から急速混和池に繋ぐ開渠は天蓋が無く上部が開放されている。越流堰から開渠へ流入する部分では落差が約 0.5 m あり、常時落下による空気の巻き込みで発泡している (Photo. 1)。急速混和池は天蓋があり、その後埋設管を通じてフロック形成池に混和水が送られる。越流堰から急速混和池に繋ぐ開渠付近では、塩素臭が強く感じられ塩素が揮発していることが想定された。そこで塩素臭が確認された着水井出口から急速混和池出口までの間で採水を行い、残留塩素濃度が低下する箇所の確認と要因の調査を行った。

2.2 採水分析

採水場所は、着水井の出口に当たる越流堰上部、落下後の開渠、混和池出口とした。越流堰は幅が約 2.7 m あり、濃度分布を確認するため、Photo. 1 に記載した着水井越流堰の上部①～③の 3 カ所、越流堰下の開渠①～③の 3 カ所とした。流量変動が小さい日中の定常運転時に複数回採水分析を行った。分析項目は遊離残留塩素とし、DPD 携帯型残留塩素測定器を用いて採水後その場で測定を行った。

3. 結果

Fig. 3 に、急速混和池の入口と出口の残留塩素濃度の分析結果を示す。急速混和池入口の残留塩素濃度が 0.5 mg/L 付近であるのに対し、出口残留塩素濃度は入口に対し ± 0.02 mg/L の僅かな差で変動しており、残留塩素の消費はほとんど生じていないことが分かる。次に Fig. 4 に着水井越流堰の上部、Fig. 5 に越流堰下の開渠の残留塩素濃度の分析結果を示す。越流堰上の残留塩素濃度は、前塩素注入率 1.1~1.2 mg/L に対して幅方向に 0.38~1.30 mg/L で分布していた。一方、越流堰下の開渠では良く混合されており幅方向の分布は見られず 0.46~0.52 mg/L と安定していた。越流堰上の平均値は 0.79 mg/L、越流堰下の平均値は 0.50 mg/L であった。原水水質で反応速度の速い成分による塩素消費から越流堰上部での残留塩素濃度 0.79 mg/L は妥当であり、越流堰からの落下前後で 0.29 mg/L の差が生じていることが確認された。

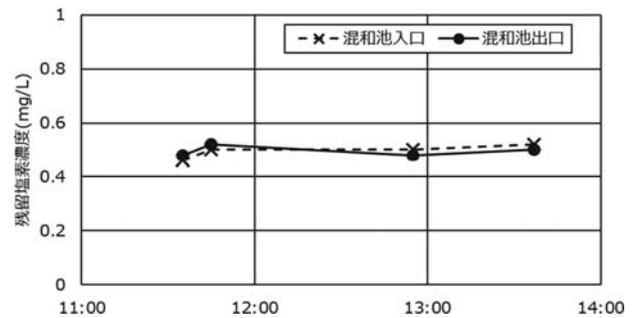


Fig. 3 Residual Chlorine Concentration Measurement Results at the Inlet and Outlet of the Mixing Tank

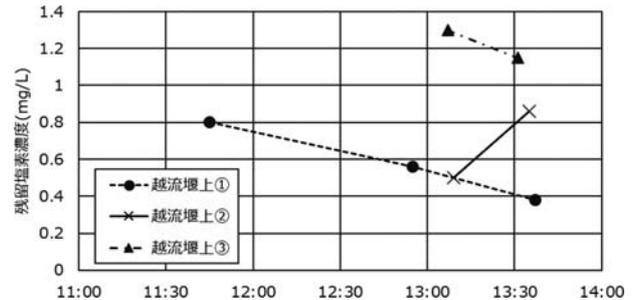


Fig. 4 Residual Chlorine Concentration Measurement Results at the Top of the Overflow Weir

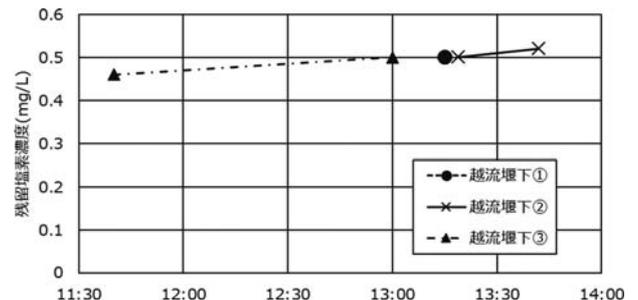


Fig. 5 Residual Chlorine Concentration Measurement Results in Open Culverts after falling Overflow Weir

4. 考 察

4.1 越流堰落水流に伴う気泡巻き込みによる塩素放散量の推定

越流堰からの落下下部で発泡していること、周辺で塩素臭が確認されたことから、越流堰落下下部において塩素が消失していると考えられた。落下水流に伴って周辺の空気が水中に巻き込まれて気泡となり、この気泡に原水中の残留塩素の一部が気液平衡によって気泡側に移動して、気泡が水面で破裂することによって残留塩素が大気へ放散されると想定し、落下水流による空気巻き込み深さ、巻き込み空気量、ガスホールドアップ量、ガス滞留時間、空気側への残留塩素移動量の順に求め、開渠における残留塩素濃度を推算した。

落下水流による空気の巻き込み深さと巻き込み空気量の推定について、赤司らの報告例⁴⁾を参考に求めた。空気の巻き込み深さは落下幅には影響をほとんど受けず、落下高さ d と落下速度に影響を受け、巻き込んだ空気による気泡が停滞する深さ X_e と落下高さ d の比が、水の表面張力 σ に対する落下速度 u_i の2乗と落下高さ d の積に対する比と相関を持つ。越流堰からの自由落下による気泡停滞深さ X_e と落下高さ d の比を表す近似式は、式(1)で表される。

$$X_e/d = a_1(\rho_a u_i^2 d / \sigma)^{-a_2} \quad \dots(1)$$

X_e : 気泡停滞深さ(m), d : 落下高さ(m), ρ_a : 空気密度(kg/m³), u_i : 液面流入速度(m/s), σ : 水表面張力(N/m), a_1, a_2 : 定数(本報では $a_1=47, a_2=0.7$ とした)

越流堰から落下高さを0.57 mとした場合では $X_e/d=1.79$ となり、これより気泡停滞深さ X_e は1.02 mと推算された。

また巻き込み空気量 Q_G については、同じく赤司らが報告した表面張力と流下速度と流下高さの比に対する巻き込み空気量のデータに基づいた近似式(2)と、採水分析時の原水流量 $Q_L=930$ m³/hより $Q_G=318.1$ m³/hと推算された。

$$Q_G/Q_L = b_1((\rho_a u_i^2 d) / \sigma)^3 + b_2((\rho_a u_i^2 d) / \sigma)^2 + b_3((\rho_a u_i^2 d) / \sigma) + b_4 \quad \dots(2)$$

b_1, b_2, b_3, b_4 : 定数($b_1=5.56 \times 10^{-7}, b_2=-1.36 \times 10^{-4}, b_3=0.0115, b_4=-0.0111$)

気泡停滞深さ X_e と巻き込み空気量 Q_G をもとに、開渠の落下下部をFig. 6に示したような気泡停滞深さを塔高として巻き込み空気量を通気量とする気泡塔と想定して、ガス放散の関係式をもとに開渠の発泡部を通過した原水の残留塩素濃度 C_{L1} を推算した。

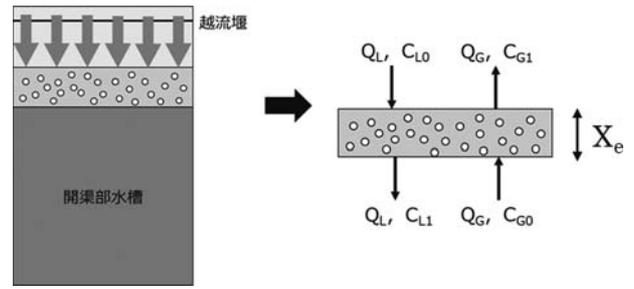


Fig. 6 Schematic Diagram of an Air-Entrainment Bubble Tower

気液接触面における物質移動が平衡状態になっていることを想定した場合、液側とガス側の物質収支がバランスしていると考えられるため、収支式は式(3)のように表される。

$$Q_L(C_{L0} - C_{L1}) = Q_G(C_{G1} - C_{G0}) \quad \dots(3)$$

Q_L : 液流量(m³/s), Q_G : ガス流量(m³/s), C_{L0} : 入口残留塩素濃度(kg/m³), C_{L1} : 出口残留塩素濃度(kg/m³), C_{G0} : 入口次亜塩素酸ガス濃度(kg/m³), C_{G1} : 出口次亜塩素酸ガス濃度(kg/m³)

但し、 C_{G0} は大気中の空気であるため0(kg/m³)と見なすことができる。

気液界面での物質移動であるため、物質移動速度 N (kg/s)は物質移動速度係数 K_L より式(4)で表される⁵⁾。

$$N = K_L A V_L (C_{L1} - C_L^*) \quad \dots(4)$$

N : 物質移動速度(kg/s), K_L : 液側境膜物質移動係数(m/s), A : 気液接触面積(m²), V_L : 気泡塔内液容積(m³)

ここで C_L^* は気泡塔出口次亜塩素酸ガス濃度と平衡となる残留塩素濃度であるが、出口残留塩素濃度と比較して非常に希薄であると考えられるため、ほぼゼロとして考えられる。また物質移動速度は式(3)の左辺と同等であるため、式(4)は式(5)、更に変形して式(6)のように表すことができる。

$$Q_L(C_{L0} - C_{L1}) = K_L A V_L C_{L1} \quad \dots(5)$$

$$\begin{aligned} C_{L1}/C_{L0} &= (Q_L / (K_L A V_L + Q_L)) \\ &= 1 / (K_L A V_L / Q_L + 1) \\ &= 1 / (K_L A t + 1) \end{aligned} \quad \dots(6)$$

t : 液滞留時間(s)

気液接触面積 A は、巻き込み空気の気泡表面積の総和である。気泡が越流堰からの落下に伴う巻き込み水深1.02 m付近でバランスしていると考えられることから、液落下速度と気泡の浮力がバランスする気泡粒径を、また巻き込み空気量からガスホールドアップ

を求め、気泡1個当たりの表面積と気泡数から気液接触面積を推算した。

まず気泡粒径については、気泡は小さい場合には球形を保つことからストークスの式(7)を適用し、液垂直落下速度3.34 m/sと同等の上昇速度となる気泡径を求めた結果、2.48 mmと求められた。

$$v_B = ((\rho_W - \rho_A)gd^2)/18\eta \quad \dots(7)$$

v_B : 気泡上昇速度 (m/s), ρ_W : 液密度 (kg/m³),
 ρ_A : ガス密度 (kg/m³), d : 気泡径 (m), η : 液粘度 (Pa·s)

水深1.02 mでの水圧は111.5 kPaであり、気泡の上昇に伴って大気圧101.3 kPaに減少していくため、液面付近での気泡径は2.73 mmとなると考えられる。気泡径には分布が生じていると考えられるが、ここでは全て均一で気泡停滞高さまで到達するものと仮定し、平均の2.60 mmとする。次に、巻き込み空気量 Q_G を通気空気量と置き換えて、坂東らの研究⁶⁾における通気空気量に対する気泡塔のガスホールドアップの報告より、ガスホールドアップは0.102と求められた。これより想定している気泡塔容積2.48 m³の気泡塔中の滞留空気量は0.253 m³となり、平均気泡径と滞留空気量から総気泡表面積は584 m²と求められた。次亜塩素酸の液側境膜物質移動係数 $K_L=8.47 \times 10^{-5}$ m/sと液滞留時間 $t=8.43$ sより、入口残留塩素濃度0.8 mg/Lとした場合、出口残留塩素濃度は0.54 mg/Lとなった。推算において仮定の部分が多いが、実測結果では0.5 mg/L程度となっているのに対し比較的近い結果が得られた。着水井から開渠への越流部の上下における残留塩素濃度の差は、越流堰からの液落下に伴って巻き込まれた気泡による放散現象によって生じていると考えられる。また、この放散現象は原水流量によって変化すると推測される。

5. ま と め

前塩素注入後から混和池出口までに残留塩素の未解明の消費があり、この現象を解明するため現地調査および採水により残留塩素濃度の分析を行った。

現地調査および水質分析の結果より、着水井の越流堰から次の混和池に向かう開渠において0.5 mの落差があり、越流堰上部と開渠部で残留塩素濃度に0.29 mg/Lの差があることが確認された。考察の結果、越流堰から開渠への落下時の塩素の消失は、原水の落下時に巻き込まれた空気による放散現象である可能性が高いと考えられた。

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、水道技術研究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——塩素消費モデルの検討, 令和3年度水道研究発表会, 4-12 (2022)
- 2) 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, 25, 99-104 (2020)
- 3) 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)
- 4) 赤司ら, 自由落下水脈の拡散に及ぼす混入空気泡の影響, 第29回水理講演会論文集, 609-613 (1985)
- 5) J. S. Cho, N. Wakao, Determination of Liquid-side and Gas-side volumetric mass transfer coefficients in a bubble column, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 21, No. 6, 576-581 (1988)
- 6) 坂東ら, 気泡塔におけるガスホールドアップと気液界面積に及ぼす気液流れ方向と塔径の影響, 化学工学論文集, No. 14, Vol. 2, 182-188 (1988)