

公募型実証研究支援事業 成果報告書

1. 依頼書受付番号 実支 第28-002号

2. 実証研究の名称

配水管網内残塩濃度の安定化を目的とした浄水残塩濃度管理方法

3. 研究成果の概要

実フィールドにおいて実証研究を行った結果、次の項目を確認した。

(1) 残塩濃度の安定化

浄水場の前次亜・後次亜プロセスを対象に、フィードバック制御導入手順としてステップ応答からプロセスのモデリング、調節計パラメータ決定方法を提案し、浄水場で実証した結果、以下の2項目について確認した。

- ① フィードバック制御の導入により、従来方式（ON-OFF制御）より目標値追随性が改善され、残塩濃度管理が容易になった。
- ② 原水変動にも対応し、従来方式よりも浄水残塩濃度低下を抑制できた。

(2) 残塩濃度の平準化

送配水系統に対して適切な追加塩素導入地点の選定手法を提案し、浄水場からの遅れ時間を基に評価関数より選定した配水池に追加塩素を導入した結果、以下の2項目について確認した。

- ① 追加塩素の導入により各観測点での残塩濃度差が減少し、送配水系統内の残塩濃度を平準化できた。
- ② 送配水系統に対して残塩濃度減少傾向を定量的に評価し、通年での末端残塩濃度や追加塩素の管理予測が可能となった。

平成31年 3月15日

企業名 株式会社 ヤマト

報告者名 新井 忠男 川端 洋之進 長谷川 孝雄

1. はじめに

1-1.背景

人口減少や節水機器の普及に伴い水消費量が減少し、配水管網内の滞留時間が増加するため、浄水場では浄水場出口の残塩濃度を高くして給水末端の残塩濃度低下を防いでいる。その一方で、管網上流域では水道水の塩素臭対策が求められている。

送配水系統の水質管理の基本として、その送り元である浄水場の浄水残塩濃度を安定化させる必要がある。しかし、人口5万人未満の地方の中小浄水場で広く用いられているON-OFF制御では通年での浄水残塩濃度の安定化に限界がある。

1-2.実証研究の目的（テーマ①）

送配水系統の水質管理の基本として、その送り元である浄水場の浄水残塩濃度をフィードバック制御により安定化させるとともに、その実装方法を確立する。

①-1 後次亜フィードバック制御

①-2 前次亜フィードバック制御

使用機器

調節計 型式:SRX

液中バルブレスポンブ 型式:YVL

1-3.実証研究の目的（テーマ②）

送配水系統の送り元から末端までの残塩濃度の平準化方法として、適切な追加塩素導入地点の選定手法を確立する。

②-1 送配水系統の残塩濃度減少傾向の定量的評価

②-2 適切な追加塩素導入地点の選定手法

②-3 追加塩素導入結果

使用機器

調節計 型式:SRX

液中バルブレスポンブ 型式:YVL

1-4.研究成果の活用方法

- ✓ フィードバック制御の適用による浄水残塩濃度の安定化
- ✓ 追加塩素設備による送配水系統の残塩濃度の平準化



残塩濃度管理による労力の軽減

1-5.スケジュール

工程	平成29年度												平成30年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
第1回実証支援委員会																								
送配水系統残塩濃度測定																								
後次亜によるフィードバック制御																								
第2回実証支援委員会																								
第3回実証支援委員会																								
前次亜によるフィードバック制御																								
第3配水池追加塩素実装																								
水道研究発表会																								
水道事業体向け現地視察会																								
第30回水道技術セミナー																								
第5回実証支援委員会																								

2. 実証フィールド

2-1. 群馬県沼田市栗生^{くりゅう}浄水場

- 処理水量：2,000m³/日
- 水源：表流水（白沢川 + 片品川）
- 処理方法：凝集沈澱 + 急速ろ過処理

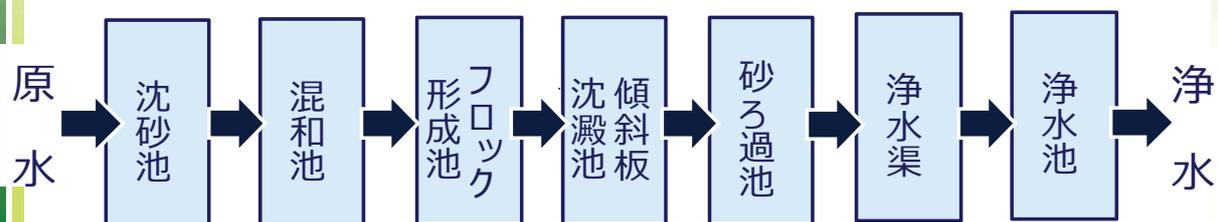


図2-1 処理フロー

2-2. 次亜制御方法

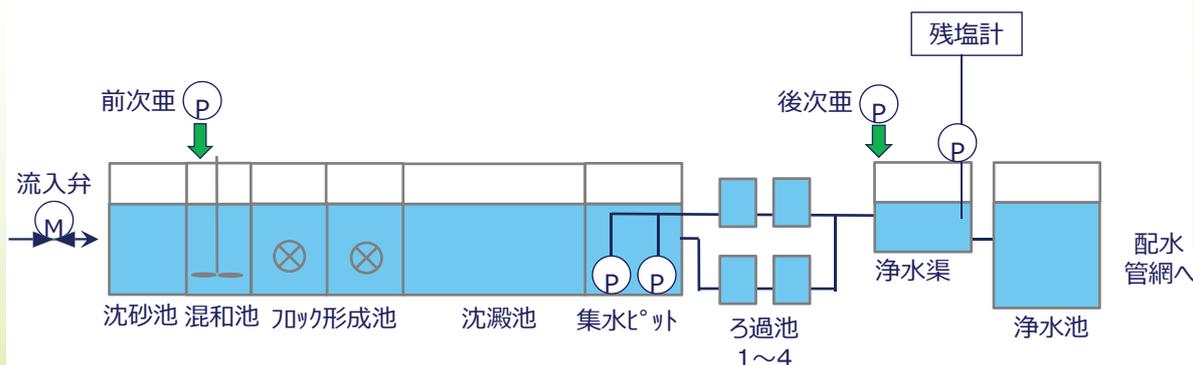


図2-2 栗生浄水場フロー図

表2-1 前次亜注入ポンプ制御方法

浄水渠水位	流入弁	前次亜ポンプ
低	開	一定量ON
高	閉	OFF

表2-2 後次亜注入ポンプ制御方法

ろ過水残塩濃度[mg/L]	後次亜ポンプ
0.4以下	一定量ON
0.6以上	OFF

2-3. 年間の原水流量・原水水温データ

平成28年10月～平成29年9月において、月ごとの平均値をグラフ化

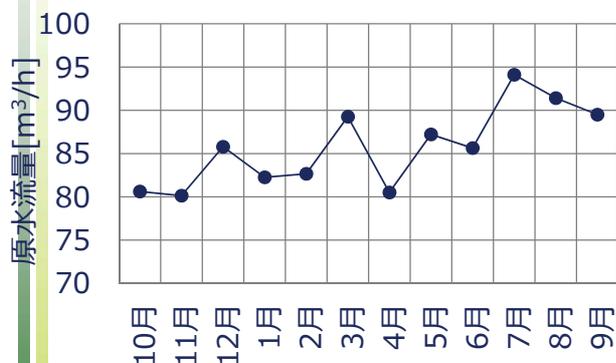


図2-3 原水流量(H28.10～H29.9)

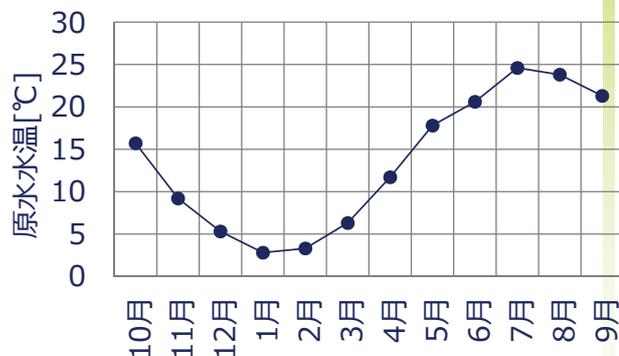


図2-4 原水水温(H28.10～H29.9)

2-4.年間の原水濁度・浄水濁度データ

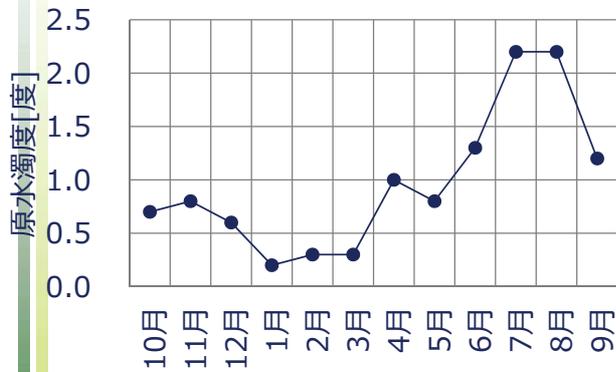


図2-5 原水濁度(H28.10~H29.9)

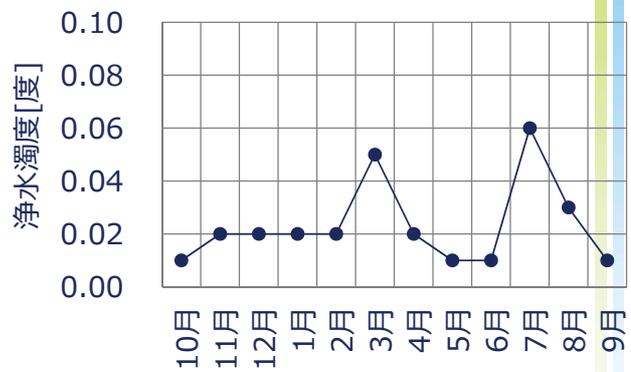


図2-6 浄水濁度(H28.10~H29.9)

2-5.年間の浄水残塩濃度・浄水pHデータ

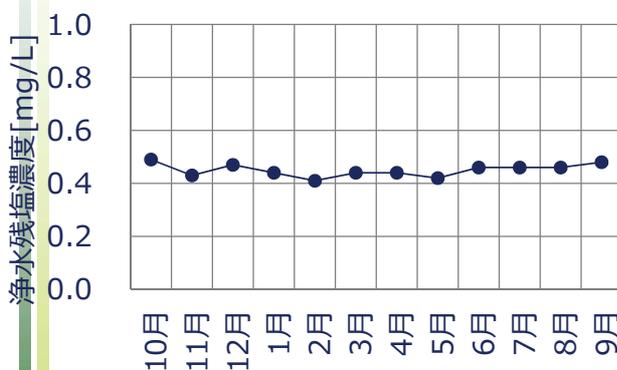


図2-7 浄水残塩濃度(H28.10~H29.9)

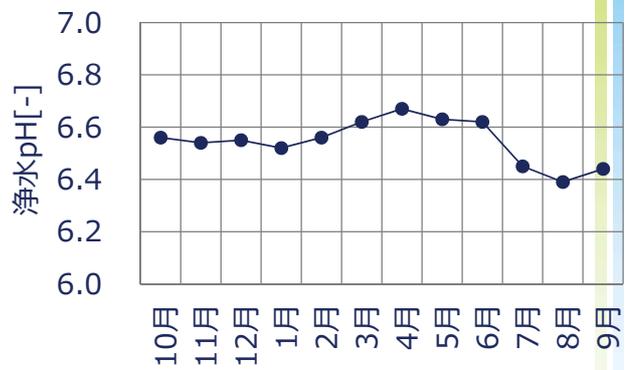


図2-8 浄水pH(H28.10~H29.9)

3. 実証研究結果（テーマ①）

3-1-1.テーマ①-1 後次亜フィードバック制御

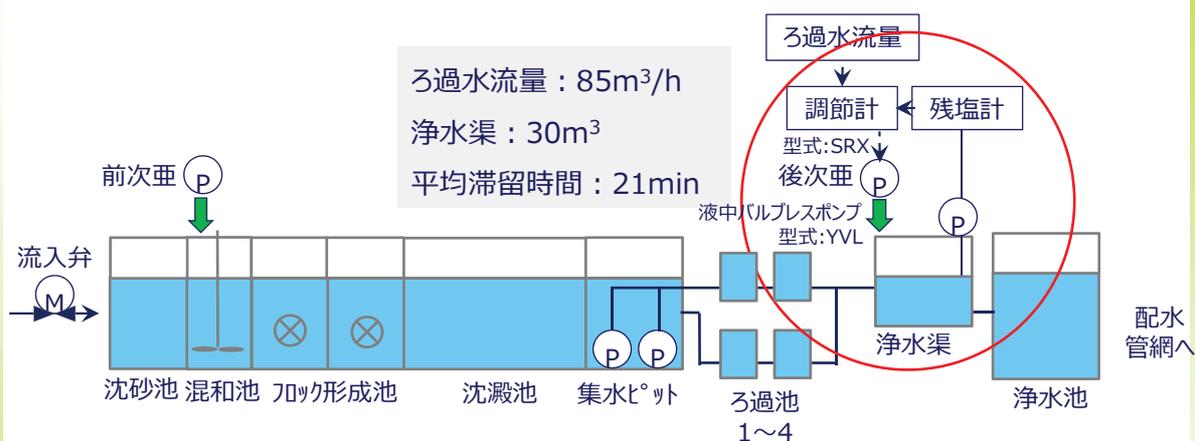


図3-1 栗生浄水場フロー図

フィードバック制御の実装に先立ち、ステップ応答により制御対象系をモデリングし、調節計パラメータを決定する。

3-1-2.後次亜プロセスに対するステップ応答結果

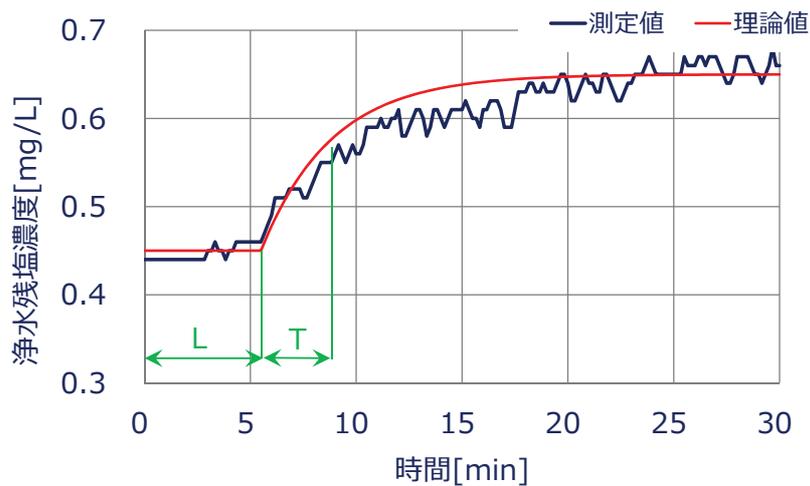


図3-2 ステップ応答結果

浄水渠へ後次亜を一定量注入し、浄水残塩濃度のステップ応答を実施。時定数(T)、むだ時間(L)を求め、制御対象系の特徴を把握する。時定数200[秒]、むだ時間330[秒]を算出。

3-1-3.CHR調整則

CHR調整則に基づき、調節計の次亜注入ポンプへの出力を調整する3パラメータ(比例定数 K_p ,積分時間 T_i ,微分時間 T_d)を算出する。

表3-1 CHR調整則

制御動作	K_p	T_i	T_d
PID	$0.6 \cdot T / (1 \cdot L)$	T	$0.5 \cdot L$

$K_p : 0.36, T_i : 200, T_d : 165$ と決定した。

3-1-4.実装開始時の浄水残塩濃度

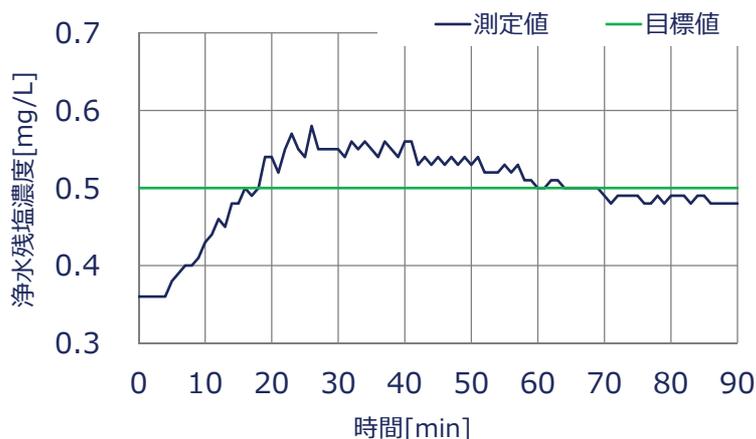


図3-3 実装開始時の浄水残塩濃度

初期0.36mg/Lの浄水残塩濃度を目標値0.5mg/Lに整定。

3-1-5.従来制御との比較



図3-4 後次亜フィードバック制御
(H29.11.7~H30.5.13 188日間)

従来制御よりも標準偏差が小さく、目標値追従性が改善した。目標値の変更により送配水システム末端の残塩濃度に応じた管理が容易になることを確認した。

3-1-6.テーマ①-2 前次亜フィードバック制御

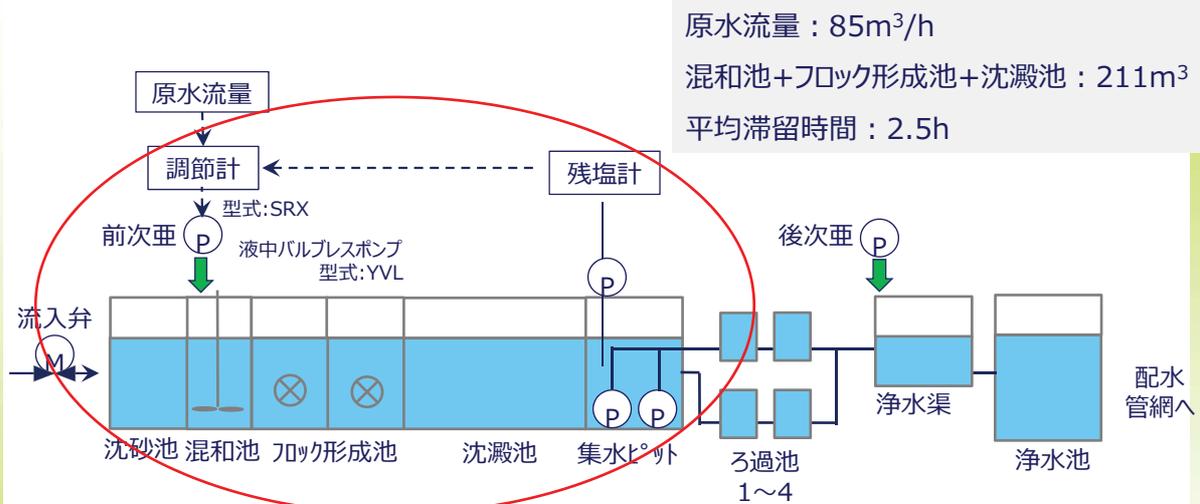


図3-5 栗生浄水場フロー図

後次亜制御と同様に、制御対象系に対してステップ応答によるモデリングを行い、フィードバック制御を実装した。

3-1-7.前次亜プロセスに対するステップ応答結果

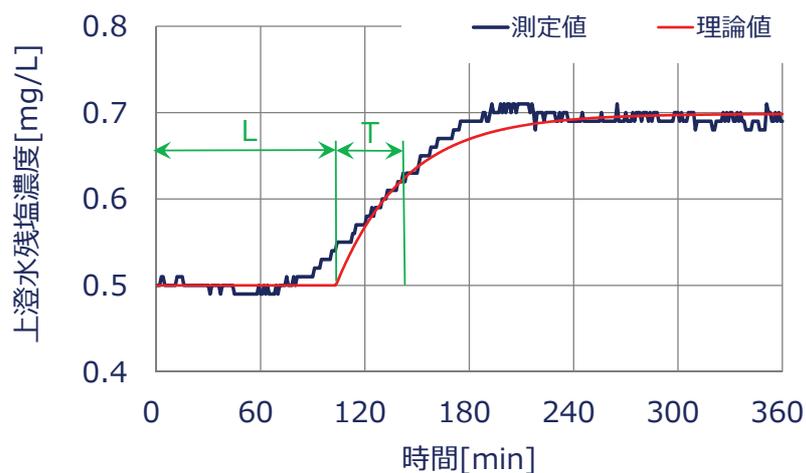


図3-6 ステップ応答結果

時定数2400[秒]、むだ時間6200[秒]を算出した。CHR調整則より、 $K_p : 0.23, T_i : 2400, T_d : 3100$ と決定した。

3-1-8.実装開始時の上澄水残塩濃度

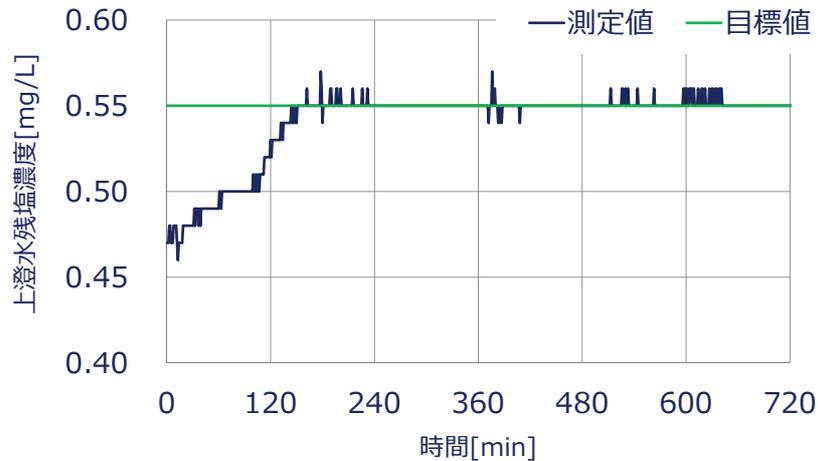


図3-7 実装開始時の上澄水残塩濃度

初期0.47mg/Lの上澄水残塩濃度を目標値0.55mg/Lに整定。

3-1-9.従来制御との比較

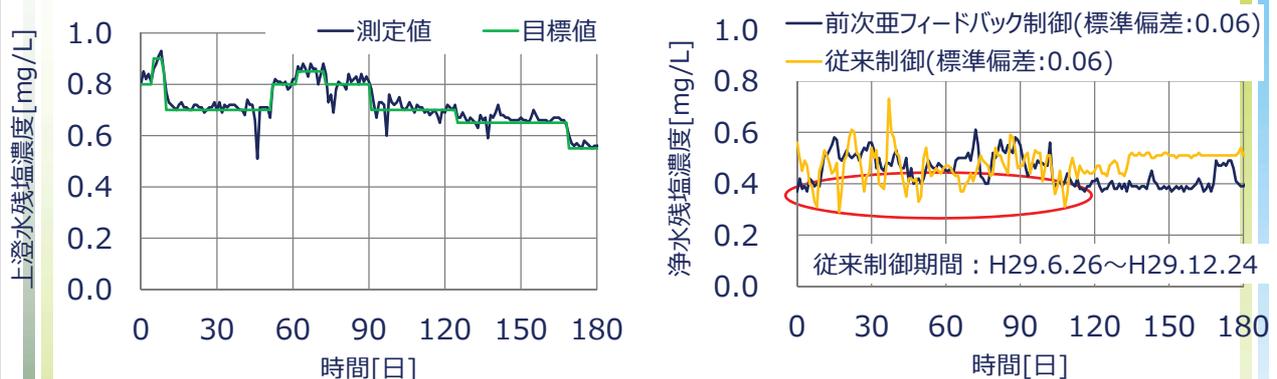


図3-8 前次亜フィードバック制御
(H30.6.26~H30.12.24 182日間)

従来制御と比べて浄水残塩濃度の標準偏差に差はないが、夏期の大雨による浄水残塩濃度低下を抑制したことが確認できた。

3. 実証研究結果（テーマ②）

3-2-1.テーマ②-1 送配水系統の残塩濃度減少傾向の定量的評価

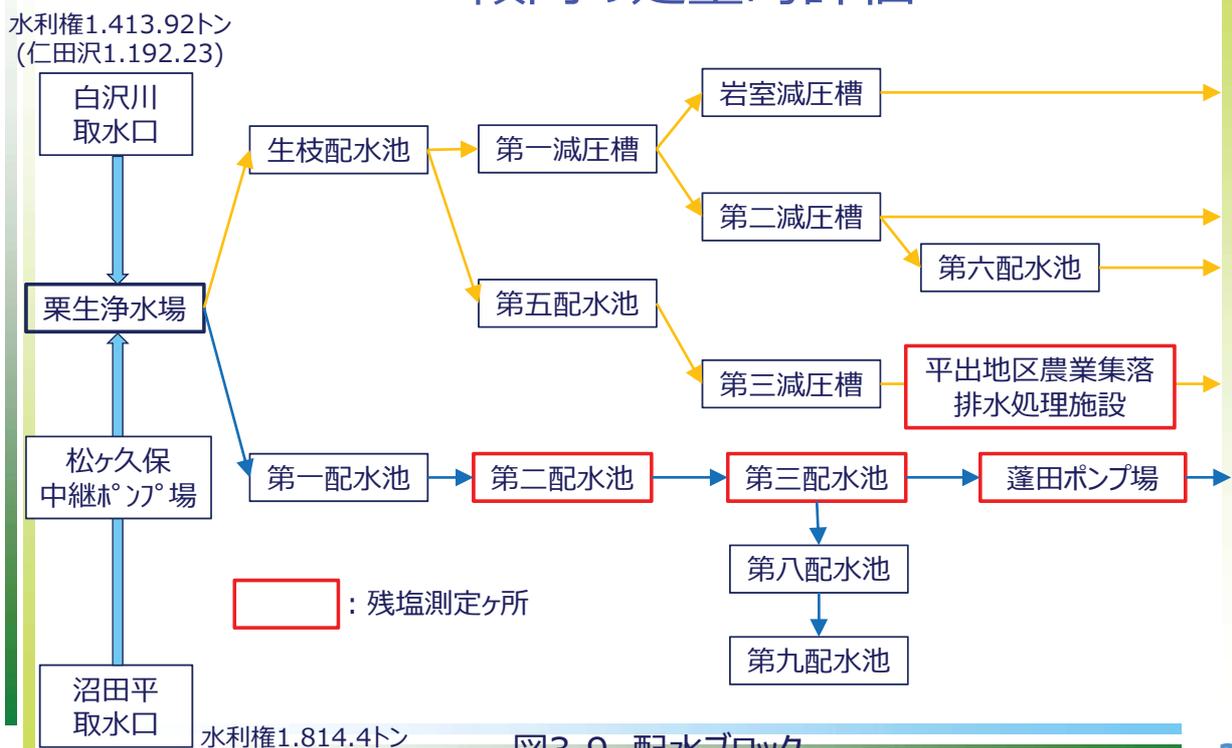


図3-9 配水ブロック



各配水池の数値は、栗生浄水場を基準にした標高差を表す。

- 栗生浄水場～蓬田ポンプ場までの幹線※長：約8km
- 栗生浄水場～平出農集までの幹線長：約10km

※ 幹線とは、水道管路図における管径Φ125～Φ300の配管を示す。

図3-10 栗生浄水場と残塩濃度測定地点の位置関係

給水栓末端で残塩濃度0.1mg/L以上維持するためには、送配水系統の残塩濃度分布の予測の元に、送り元である浄水残塩濃度を選定することが望ましい。

モデル式としては、一次反応速度式を用いるのが一般的である。

$$C_t = C_0 \exp(-k * t)$$

C_t : t時間経過時の残塩濃度[mg/L]

C_0 : 初期残塩濃度[mg/L]

k : 残塩濃度減少速度係数[h⁻¹]

t : 時間[h]

各配水池の残塩濃度及び遅れ時間を求め、残塩濃度減少速度を表す係数kを試算する。

3-2-2.各配水池の残塩濃度

※ 原水水温 : 23℃

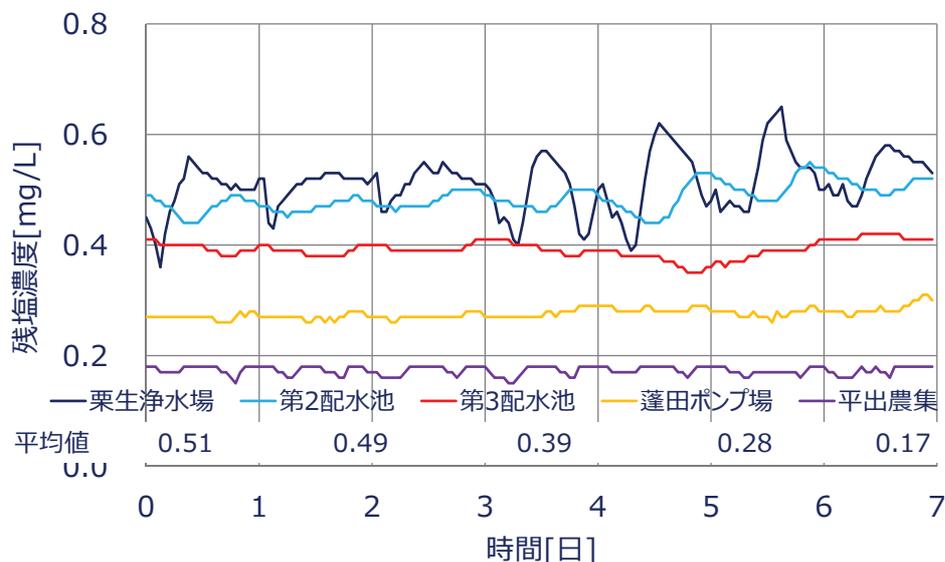


図3-11 各配水池の残塩濃度 (H30.7.18~24)

3-2-3.各配水池の送り元からの遅れ時間算出

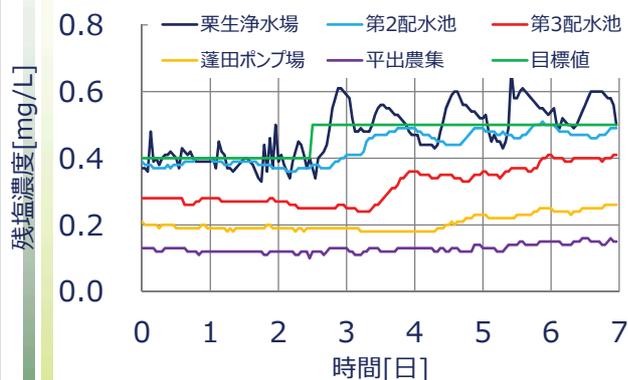


図3-12 各配水池の残塩濃度 (H30.7.4~H30.7.10)

- (1) 平出農集残塩濃度が0.15mg/Lを下回ったため、栗生浄水場浄水残塩濃度を0.4→0.5mg/Lに調整した。
- (2) それに伴い、第2,3配水池及び蓬田ポンプ場の残塩濃度が上昇していることが認められる。
- (3) 応答の遅れから、各配水池の遅れ時間を試算した。

各地点間において、応答遅れが認められる時間帯に着目する(図3-13,14)。プロットを1時間単位で時間軸方向にスライドし、スライド時間ごとに相互相関係数を求めた。相互相関係数が最も高いスライド時間を強い相関があると判断し、遅れ時間とした。

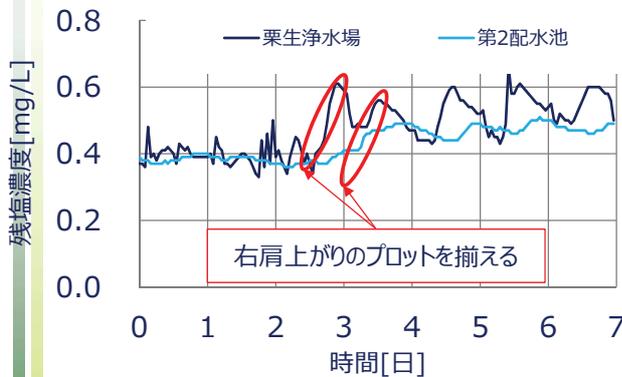


図3-13 栗生浄水場と第2配水池の応答遅れ



図3-14 第2配水池と第3配水池の応答遅れ

相互相関係数 $r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{V_x * V_y}}$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})$$

k : 遅れ時間[h] y_{t+k} : t時点での入力値 x_t : t時点での入力値 V_x, V_y : x, yの分散

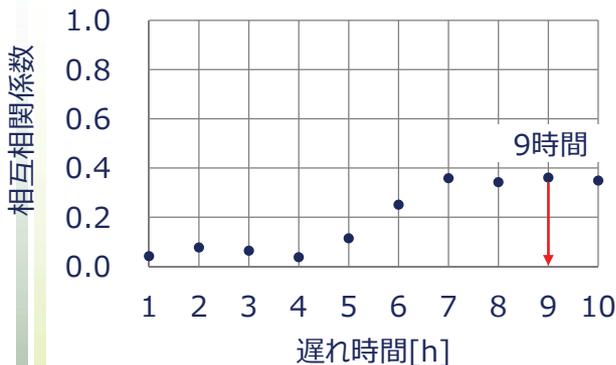


図3-15 栗生浄水場と第2配水池のコレログラム

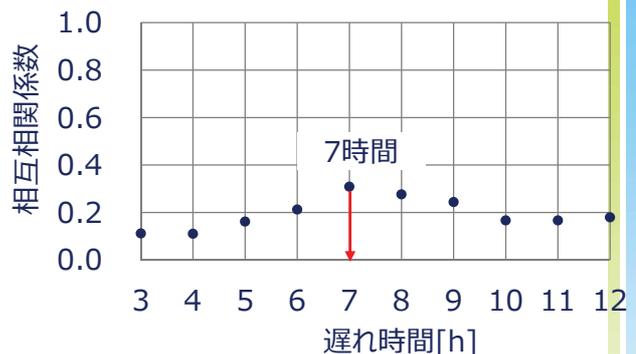


図3-16 第2配水池と第3配水池のコレログラム

栗生浄水場と第2配水池の遅れ時間は9時間、第2配水池と第3配水池の遅れ時間は7時間と判断した。

同様の計算にて、第3配水池と蓬田ポンプ場の遅れ時間は16時間、栗生浄水場と平出農集の遅れ時間は60時間と判断した。

3-2-4.速度係数算出

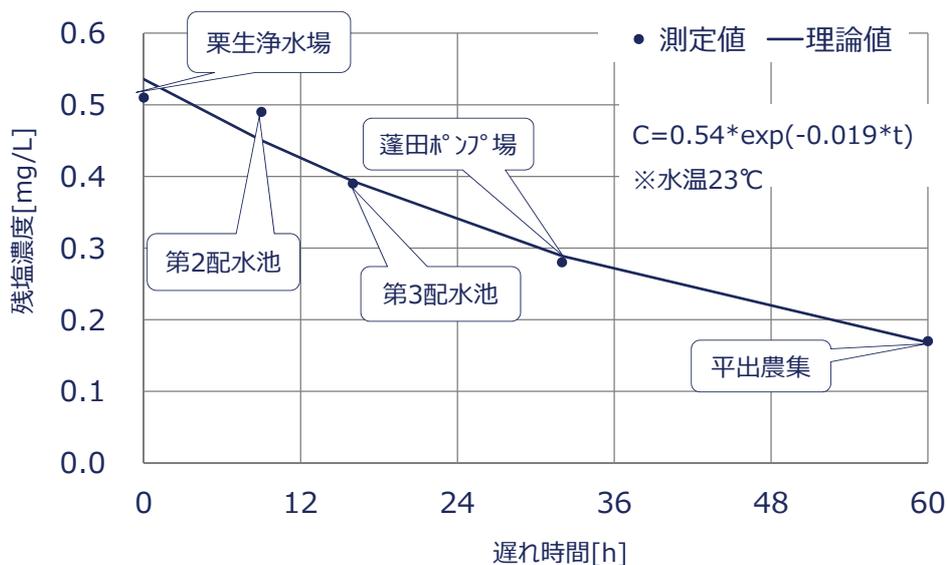


図3-17 各配水池の遅れ時間と残塩濃度の関係

グラフより、水温23℃における速度係数は、0.019[h⁻¹]となった。

表3-3 水温23℃における各浄水場の速度係数

事業体	実測対象水	水源	速度係数 k[h ⁻¹]
東京都水道局	金町浄水場系給水栓水	江戸川	0.002
千葉県水道局	柏井浄水場東側浄水	印旛沼	0.005
	栗山浄水場浄水	江戸川	0.015
	※1	江戸川	0.011
	北総浄水場浄水	利根川	0.009
	福増浄水場浄水	高滝ダム	0.014
	※2	小櫃川	0.014
沼田市	栗生浄水場	白沢川	0.019

※1北千葉広域水道企業団から受水した浄水

※2君津広域水道企業団から受水した浄水

札幌市水道局の夏期測定結果 k=0.0186[h⁻¹] ←近い値である。

※ 水道技術研究センター 管路内残留塩素濃度管理マニュアルP64

表3-4 第1配水池系統

名称	配水池容量 [m ³]	幹線 ^{※1} 長 [km]	幹線容量 [m ³]	配水流量 [m ³ /h]	滞留時間 ^{※2} [h]	積算滞留時間 [h]
栗生浄水場 浄水池	456	-	-	76	6.0	6.0
栗生～第1	-	0.5	15	49	0.3	6.3
第1配水池	100	-	-	49	2.0	8.3
第1～第2	-	1.1	36	42	0.9	9.2
第2配水池	150	-	-	42	3.6	12.8
第2～第3	-	3.9	98	12	8.2	21.0
第3配水池	160	-	-	12	13.3	34.3
第3～蓬田	-	2.3	38	1.8	21.1	55.4
蓬田ポンプ場	18	-	-	1.8	10.0	65.4

第1配水池系統の配管材質は、すべて塩ビである。

※1 ここでは、幹線とは水道管路図における管径Φ125～Φ300の配管を示す。

※2 各地点の配水池容量あるいは幹線容量を配水流量で割った値。

表3-5 積算滞留時間と遅れ時間の比較

名称	滞留時間 [h]	積算滞留時間 [h]	遅れ時間 [h]
栗生浄水場 浄水池	6.0	6.0	0
栗生～第1	0.3	6.3	-
第1配水池	2.0	8.3	-
第1～第2	0.9	9.2	-
第2配水池	3.6	12.8	9
第2～第3	8.2	21.0	-
第3配水池	13.3	34.3	16
第3～蓬田	21.1	55.4	-
蓬田ポンプ場	10.0	65.4	32

管路のループ化による流れの影響や配水池容量の変動、池内の短絡流が存在するため、水路図から遅れ時間を推定することは難しい。

年間を通して、予測精度の高い残塩濃度分布を求めるには、各配水池での残塩濃度測定に加えて、季節ごとの遅れ時間測定が求められる。

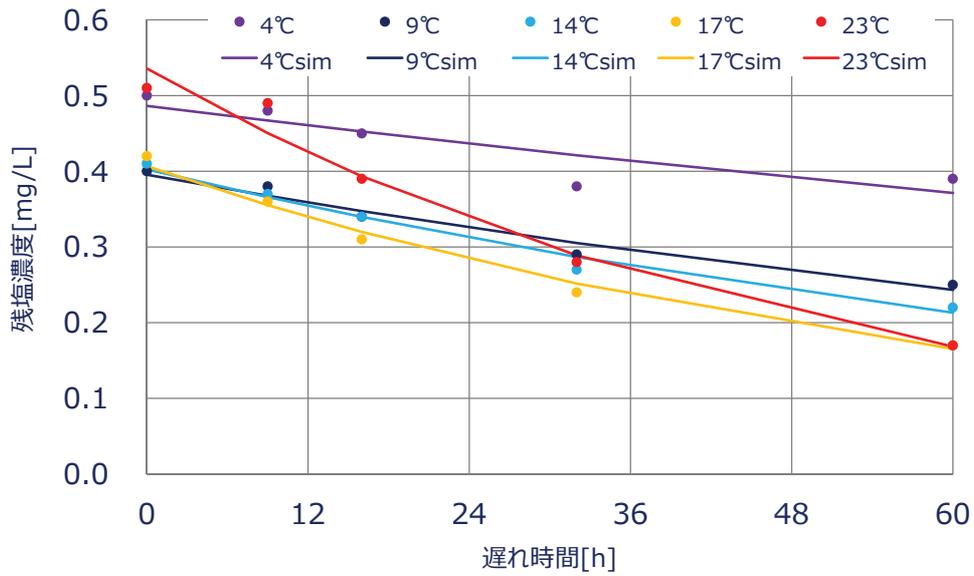


図3-18 水温をパラメータとした遅れ時間と残塩濃度の関係
(遅れ時間は、23℃値を代表値とした)

ここでは、遅れ時間は23℃値を代表値として、水温をパラメータとした各残塩濃度減少傾向について速度係数を求めた。

3-2-5.水温と速度係数の関係

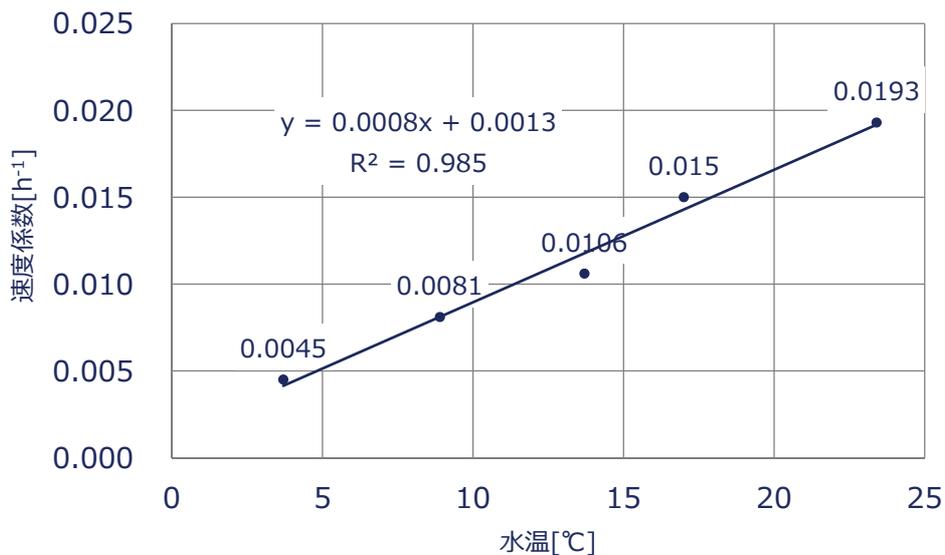


図3-19 水温と速度係数の関係

水温上昇に比例して、速度係数も上昇。水温から速度係数を算出できる。

(2)遅れ時間に基づいた評価関数式

配水池スコアの評価関数を下記のように定義する。

$$f_n = \alpha_n \times \beta_n$$

f_n : 配水池スコア[h²]
 α_n : 配水池前段の遅れ時間[h]
 β_n : 配水池後段の遅れ時間[h]

上式スコアを100点満点換算する

$$F_n = \frac{400}{\tau_{all}^2} \times \alpha_n \times \beta_n$$

F_n : 配水池スコア[-]

τ_{all} : 系列の総遅れ時間[h]

$$\tau_{all} = \alpha_n + \beta_n$$

※ τ_{all} は年間を通して一定とする

(3)配水池スコア計算(遅れ時間由来)

表3-5の遅れ時間データを元にスコア計算



表3-6 遅れ時間基準の配水池スコア

項目	栗生浄水場	第1配水池	第2配水池	第3配水池	蓬田ポンプ場
α_n	0	-	9	16	32
β_n	32	-	23	16	0
f_n	0	-	207	256	0
F_n	0	-	81	100	0

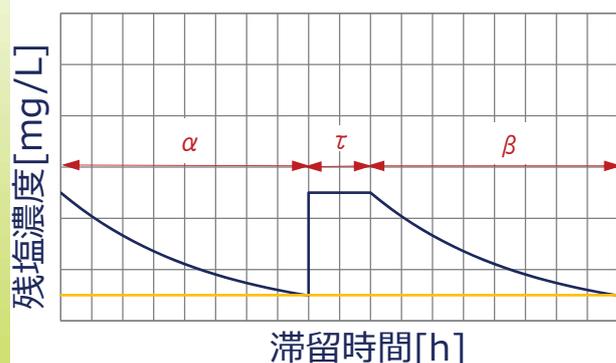
第3配水池のスコアが最も高く、最適な追加塩素導入地点と判断した。

遅れ時間に基づく評価関数は、流量計が未設置の送配水系統に対しても選定可能であり、設備的な制約に縛られない実践的な選定手法である。

3-2-7.適切な追加塩素導入地点の選定手法 (滞留時間由来)



α : 着目する配水池よりも前段の積算滞留時間 β : 着目する配水池よりも後段の積算滞留時間



τ が大きい配水池を追加塩素地点とすることで、減少時間を短くし、ばらつきを小さくすることができる。
 α と β と τ の積に基づいた評価関数を作成する。

図3-21 α 、 β 、 τ と残塩濃度の関係

※ 追加塩素を行う配水池の残塩濃度は均一とする。

(1) 評価関数式

配水池スコアの評価関数を下記のように定義する。

$$f_n = \alpha_n \times \beta_n \times \tau_n$$

f_n : 配水池スコア[h³]
 α_n : 配水池前段の滞留時間[h]
 β_n : 配水池後段の滞留時間[h]
 τ_n : 配水池滞留時間[h]

上式スコアを100点満点換算する

$$F_n = \frac{2700}{\tau_{all}^3} \times \alpha_n \times \beta_n \times \tau_n$$

F_n : 配水池スコア[-]
 τ_{all} : 系列の総滞留時間[h]

※ τ_{all} は年間を通して一定とする
配水池残塩濃度は均一とする

(2) 配水池スコア計算(滞留時間由来)

表3-5の積算滞留時間データを元にスコア計算

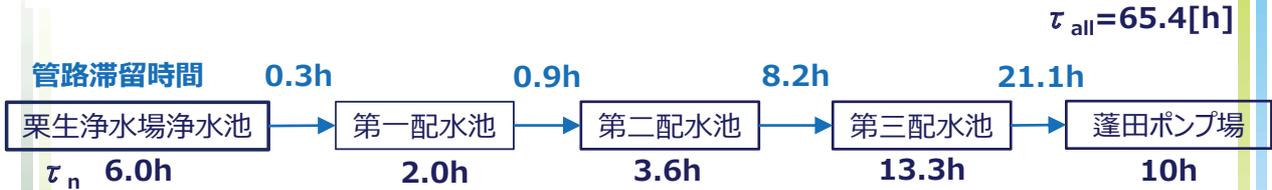


表3-7 滞留時間由来の配水池スコア

項目	栗生浄水場	第1配水池	第2配水池	第3配水池	蓬田ポンプ場
α_n	0	6.3	9.2	21.0	55.4
β_n	59.4	57.1	52.6	31.1	0
τ_n	6.0	2.0	3.6	13.3	10
f_n	0	719	1742	8686	0
F_n	0	7	17	84	0

第3配水池のスコアが最も高く、適切な追加塩素導入地点と判断した。
遅れ時間由来の選定結果と一致した。

3-2-8.テーマ②-3 追加塩素導入結果

配水流量 : 12m³/h(288m³/日)

配水池 : 160m³

平均滞留時間 : 13時間

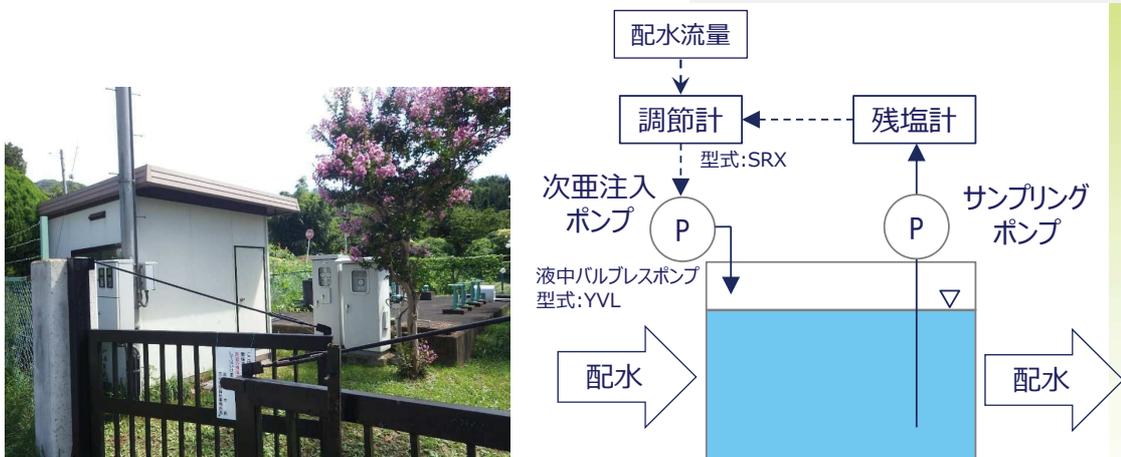


図3-22 第3配水池概略図

第3配水池にフィードバック制御による追加塩素を実装。

3-2-9.配水池に対するステップ応答結果

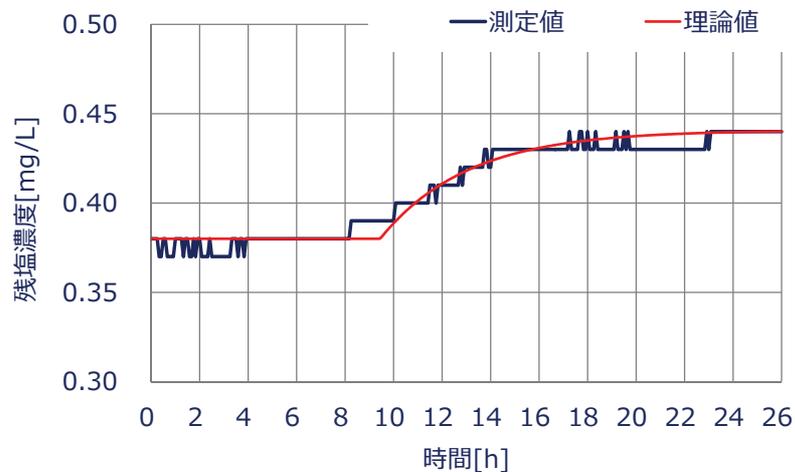


図3-23 ステップ応答結果

時定数13000[秒]、むだ時間34000[秒]を算出した。

CHR調整則に基づき、パラメータを $K_p : 0.13$, $T_i : 15600$ と決定した。

3-2-10.実装開始時の残塩濃度

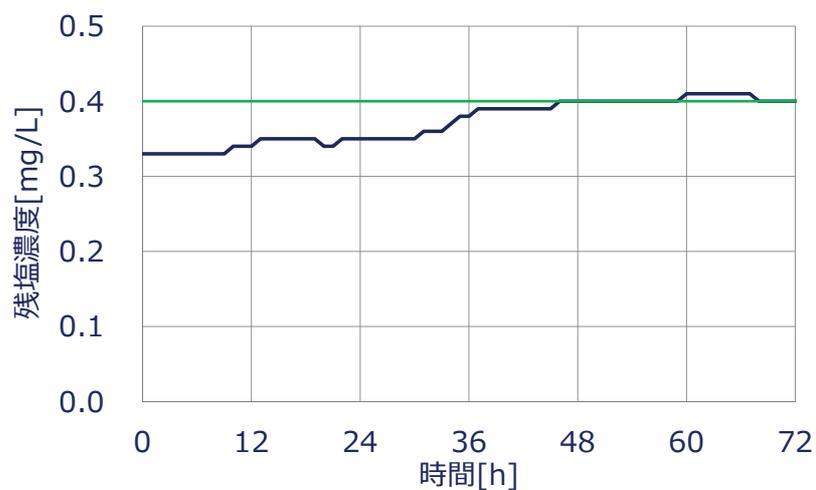


図3-24 実装開始時の残塩濃度推移

初期0.33mg/Lの残塩濃度を目標値0.4mg/Lに整定。

3-2-11. 第3配水池への追加塩素導入結果

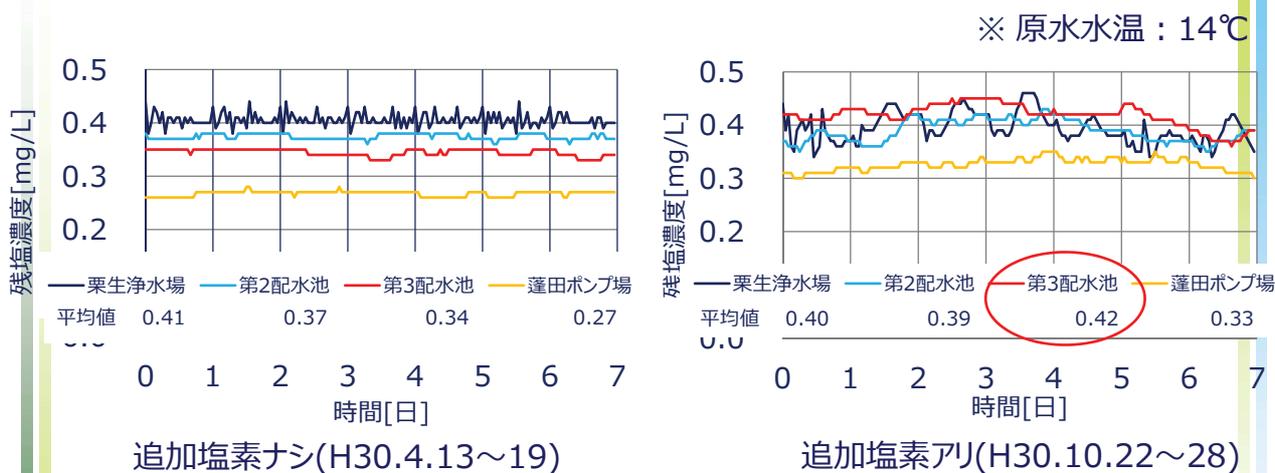


図3-25 第3配水池追加塩素による各配水池残塩濃度

第3配水池の追加塩素により、蓬田ポンプ場の残塩濃度が上昇した。各測定点間の濃度差が小さくなり、残塩濃度の平準化を確認した。

3-2-12. 測定値とシミュレーション値の比較

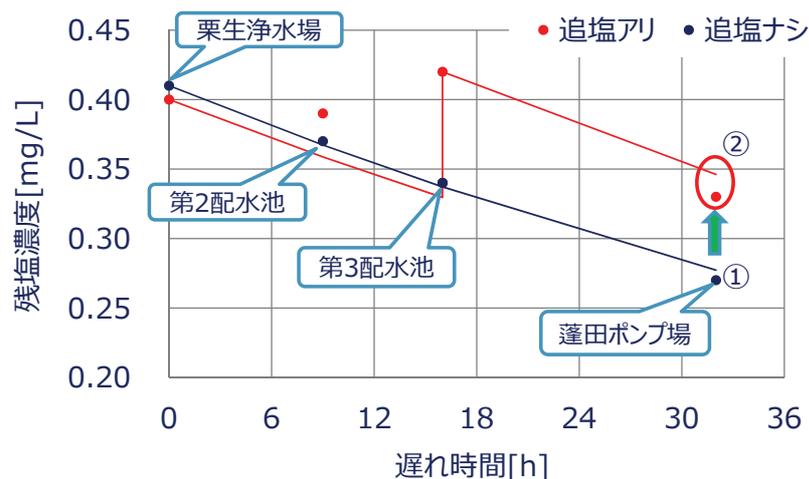


図3-26 追加塩素による残塩濃度平準化 (水温14℃)

- (1) 第3配水池での追加塩素により、末端である蓬田ポンプ場の残塩濃度を高めることで、送り元と末端間の残塩濃度差約0.1mg/Lの改善を確認した。
- (2) 蓬田ポンプ場残塩濃度測定値は、初期値を第3配水池残塩濃度としたシミュレーション値とほぼ一致しており再現性を確認した。

3-2-13.年間を通しての管理予測

□ 条件 (1) 送配水系統末端である蓬田ポンプ場残塩濃度を0.2mg/Lにするための送り元や追加塩素地点の残塩濃度設定値を水温別に試算する。

(2) シミュレーションに用いる速度係数は、実証研究値を用いる。

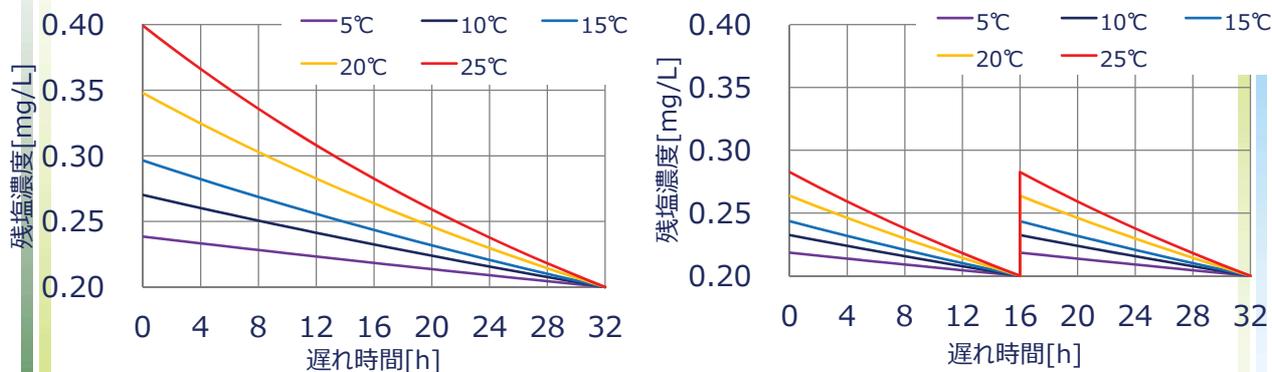


図3-27 送り元や追加塩素地点の残塩濃度設定シミュレーション

左図より水温25℃で追加塩素がなければ、栗生浄水場浄水残塩濃度は0.4mg/Lの設定が求められるのに対し、第3配水池への追加塩素により0.27mg/Lで済むことが分かる(右図)。通年での末端残塩濃度や追加塩素の管理予測が可能となった。

4. まとめ

1. 浄水場の前次亜・後次亜プロセスを対象に、フィードバック制御導入手順としてステップ応答からプロセスのモデリング、調節計パラメータ決定方法を提案し、浄水場で実証した結果、以下の2項目について確認した。

- (1) フィードバック制御の導入により、従来方式（ON-OFF制御）より目標値追随性が改善され、残塩濃度管理が容易になった。
- (2) 原水変動にも対応し、従来方式よりも浄水残塩濃度低下を抑制できた。

2. 送配水系統に対して適切な追加塩素導入地点の選定手法を提案し、浄水場からの遅れ時間を基に評価関数より選定した配水池に追加塩素を導入した結果、以下の2項目について確認した。

- (1) 追加塩素の導入により各観測点での残塩濃度差が減少し、送配水系統の残塩濃度を平準化できた。
- (2) 送配水系統に対して残塩濃度減少傾向を定量的に評価し、通年での末端残塩濃度や追加塩素の管理予測が可能となった。