

# 実証研究成果報告書

1. 依頼書受付番号 実支 第31-002号

## 2. 実証研究の名称

AIを活用した最適化技術（塩素注入の最適化）の開発に関する実証研究

## 3. 研究成果の概要

処理水質の管理値を担保した上で運用にかかる薬品コストを最小にする最適化技術に関し、塩素注入を対象として実フィールドで実証を行い、実原水における有効性を確認した。この技術を用いることにより、より高精度な塩素注入制御が可能となる。

なお、最適化技術とは、物理・化学モデルであるホワイトボックスモデルとAIを活用したブラックボックスモデルの組み合わせによる高精度な予測モデルを作成し、これを活用することで最適な制御設定値を算出する技術である。

### (1) 原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証

- ① 無機物・有機物との反応、紫外線による分解、揮発放散による消失モデルを組合せ、塩素消費ホワイトボックスモデルを立案し、実測値と比較・検証した。塩素注入率に対し、滞留時間に基づいて浄水プロセス内における残留塩素濃度の予測値が算出可能であることを確認した(本文 P.39 参照)。

### (2) AIによるソフトセンシングモデルの検証

- ① 原水水質推定においてAIを活用したソフトセンシングモデル（ブラックボックスモデル）を構築した。
- ② 塩素消費ホワイトボックスモデルに実装できていない未説明の塩素消費反応分を補正する誤差補正モデル(ブラックボックスモデル)を構築した。ろ過水の残留塩素濃度を平均絶対誤差約 0.045mg/L の精度で予測できることを確認した(本文 P.64 参照)。

### (3) 塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価

- ① 最適値演算手法で算出した塩素注入率の最適演算値によるコスト削減の効果を試算した結果、年間を通じて塩素注入量を約 11.0%削減可能であることを確認した(本文 P.71 参照)。
- ② 塩素注入率の最適演算値に基づき、浄水場の実注入率を1時間ごとに8時間にわたり変更し、残留塩素濃度の目標値 0.1mg/L に対する追従性を検証した。その結果、開始から6時間後に目標値に追従することを確認した

(本文 P.77 参照)。また、原水水質にほとんど違いが見られなかった前日の塩素注入量と比較し、塩素注入量を 6.1%削減できることを確認した(本文 P.82 参照)。

令和 5 年 3 月 9 日

企業名 東芝インフラシステムズ株式会社  
報告者 横山 雄、金谷 道昭、毛受 卓、  
鷹箸 幸夫、松本 隼

# 研究課題公表による実証研究(A-IDEA)

## 成果報告書

テーマ③: 情報技術の活用による水道事業の基盤強化に資する研究  
かつ実フィールドでの実証を必要とする研究

### AIを活用した最適化技術 (塩素注入の最適化)の開発

**TOSHIBA**

東芝インフラシステムズ株式会社

2023.3.9

## Contents

- 01 研究概要と研究目標
- 02 実証試験設備の概要
- 03 最適化技術の概要  
– 残留塩素濃度予測モデルと最適演算の内容 –
- 04 確認項目① 原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証（オフライン検証）
- 05 確認項目② AIによるソフトセンシングモデルの検証（オフライン検証）
- 06 確認項目③ 塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価（現地実証試験）
- 07 WEB監視画面 – 演算結果表示用 P C –
- 08 まとめ

# 01

## 研究概要と研究目標

## 水道事業における課題

### 人材の不足

- 労働人口の減少による人手の不足
- 団塊の世代の大量退職による保有技術の継承

### 財政の悪化

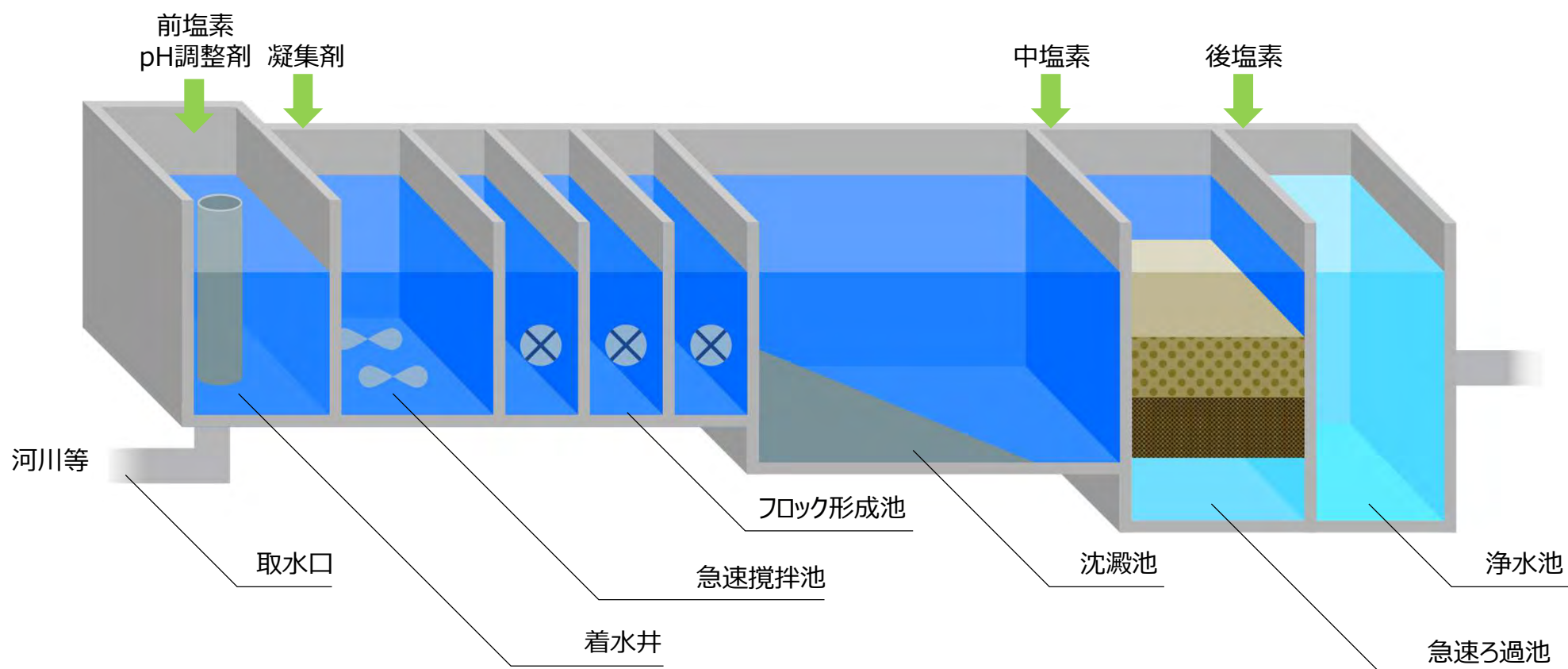
- 人口減少による水需要低下
- 節水機器の普及等による一人当たりの使用量の減少



情報技術の活用による  
労働力減少社会における水道施設等の維持管理の省力化及び  
自動化の推進が求められている

## 研究の背景

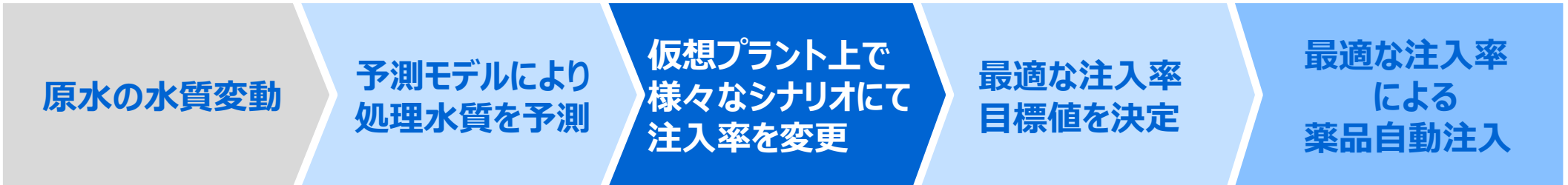
浄水場の水処理プロセスにおいて、水質基準を守り、安全で良質な水道水を提供するために、原水の水質に応じて適切な薬品の注入率を設定することは重要な操作である。



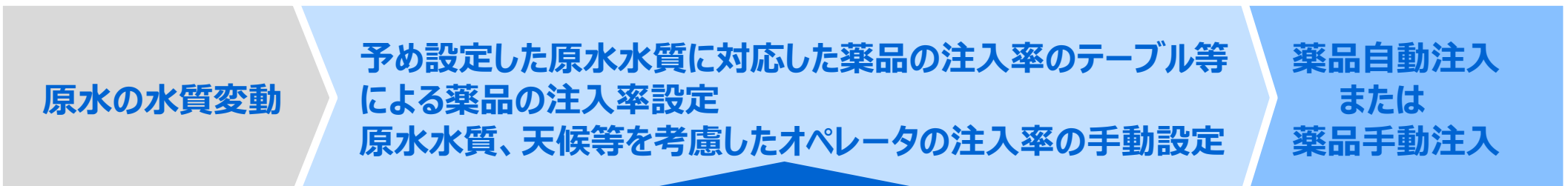
## 課題解決に向けた提案手法

予測モデルにより処理水質をリアルタイムに予測。その予測モデルを用いた仮想プラント上で、原水水質変動時にも最適な注入率目標値を算出。これら予測モデルに活用した最適化技術を開発。

### 開発方式 – 最適化技術による制御 –



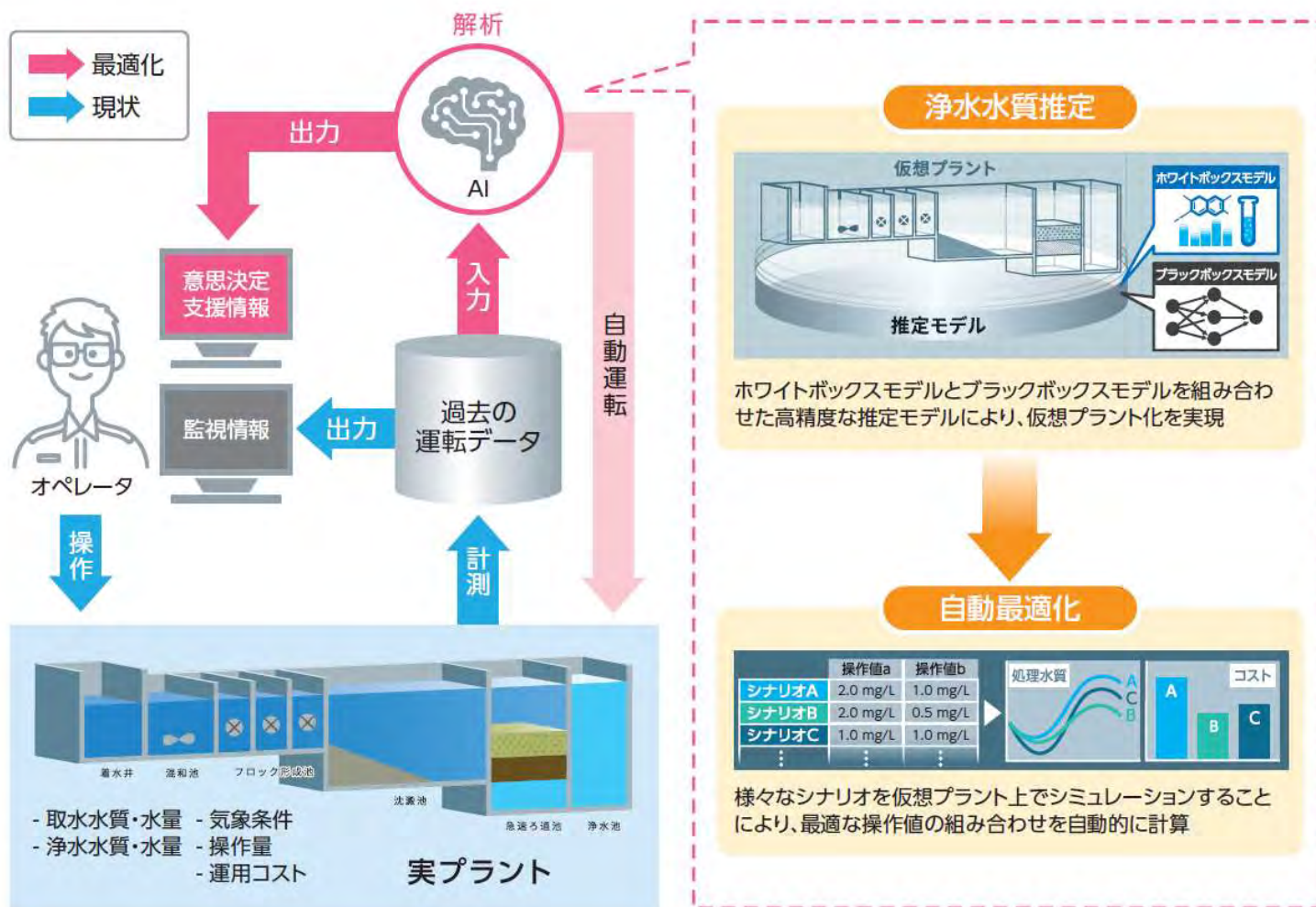
### 従来方式



ベテランの知見、経験、ノウハウ



# 実証研究の概要 – 実証する技術 –



## 最適化とは...

処理水質の管理値を担保した上で、運用にかかる薬品などのコストを最小にすること

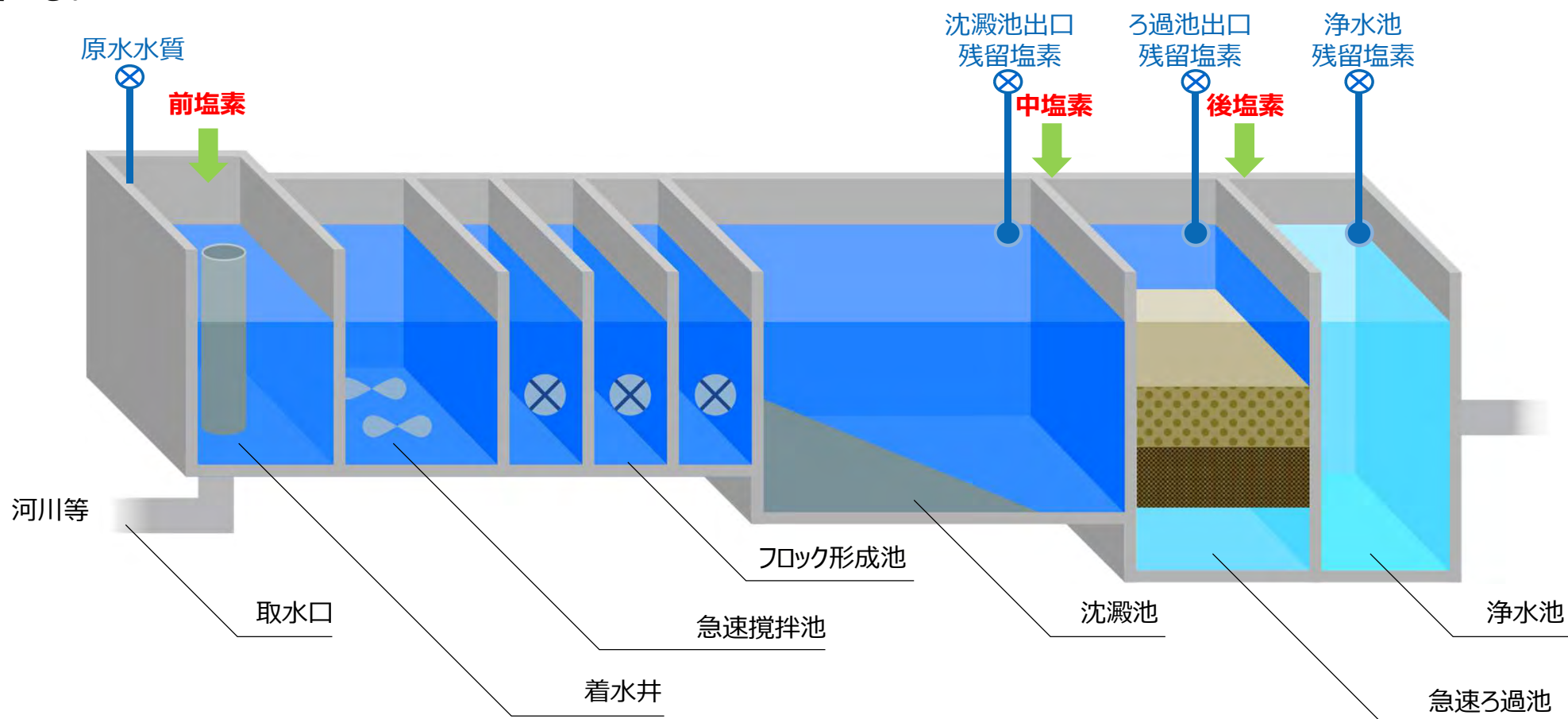
## 最適化技術とは...

この最適化を実現するために、**物理・化学モデルであるホワイトボックスモデルとAIを活用したブラックボックスモデルの組み合わせ**による高精度な予測モデルを作成し、これを活用することで**最適な制御設定値を算出**する技術である。

塩素、活性炭、凝集剤、pH調整剤等の浄水処理で使用されるあらゆる薬品の注入を対象としている。

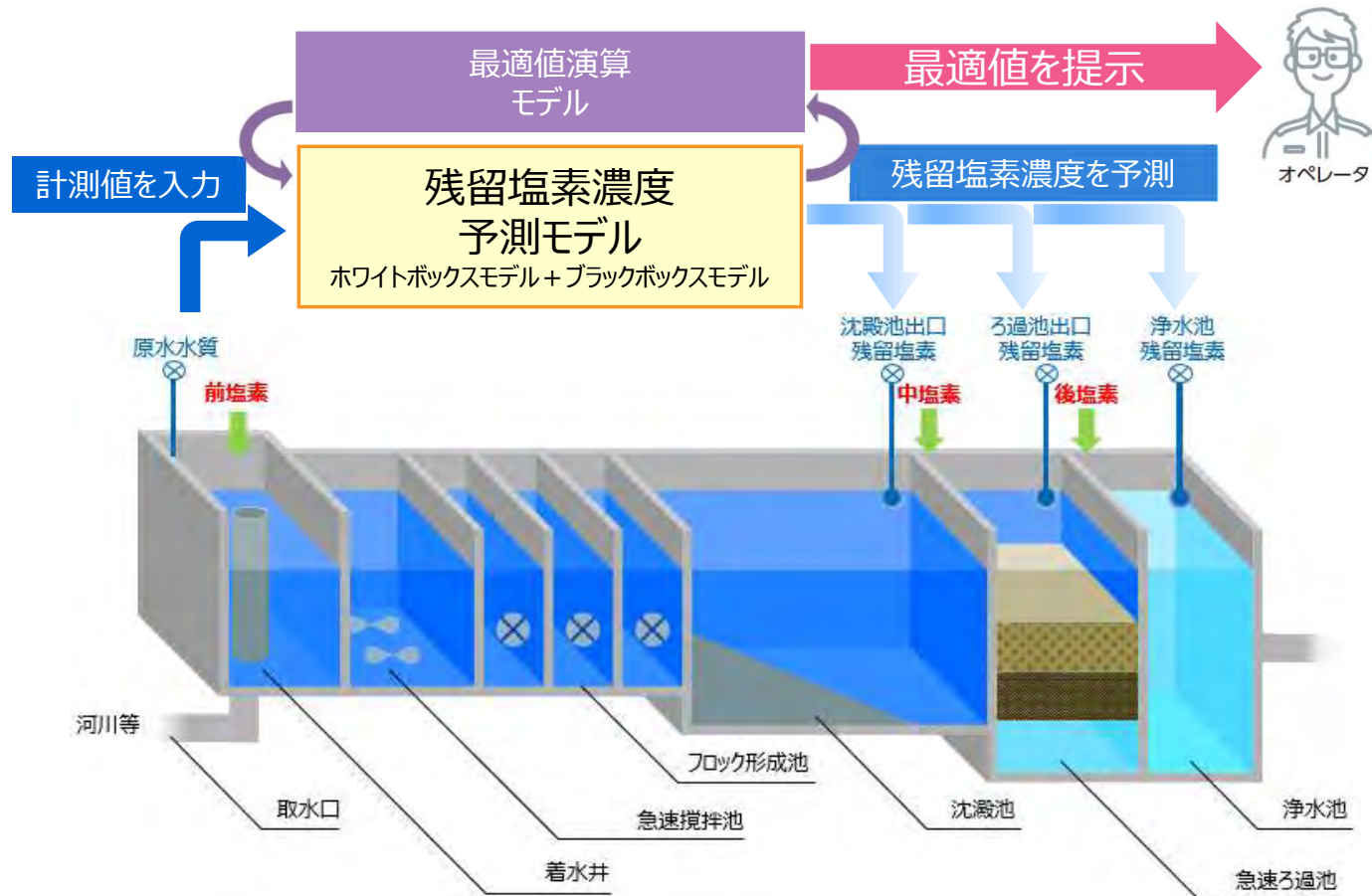
## 本実証研究の範囲

本実証研究では、塩素、活性炭、凝集剤、pH調整剤等の浄水処理で使用される薬品のうち**塩素注入**を対象としている。



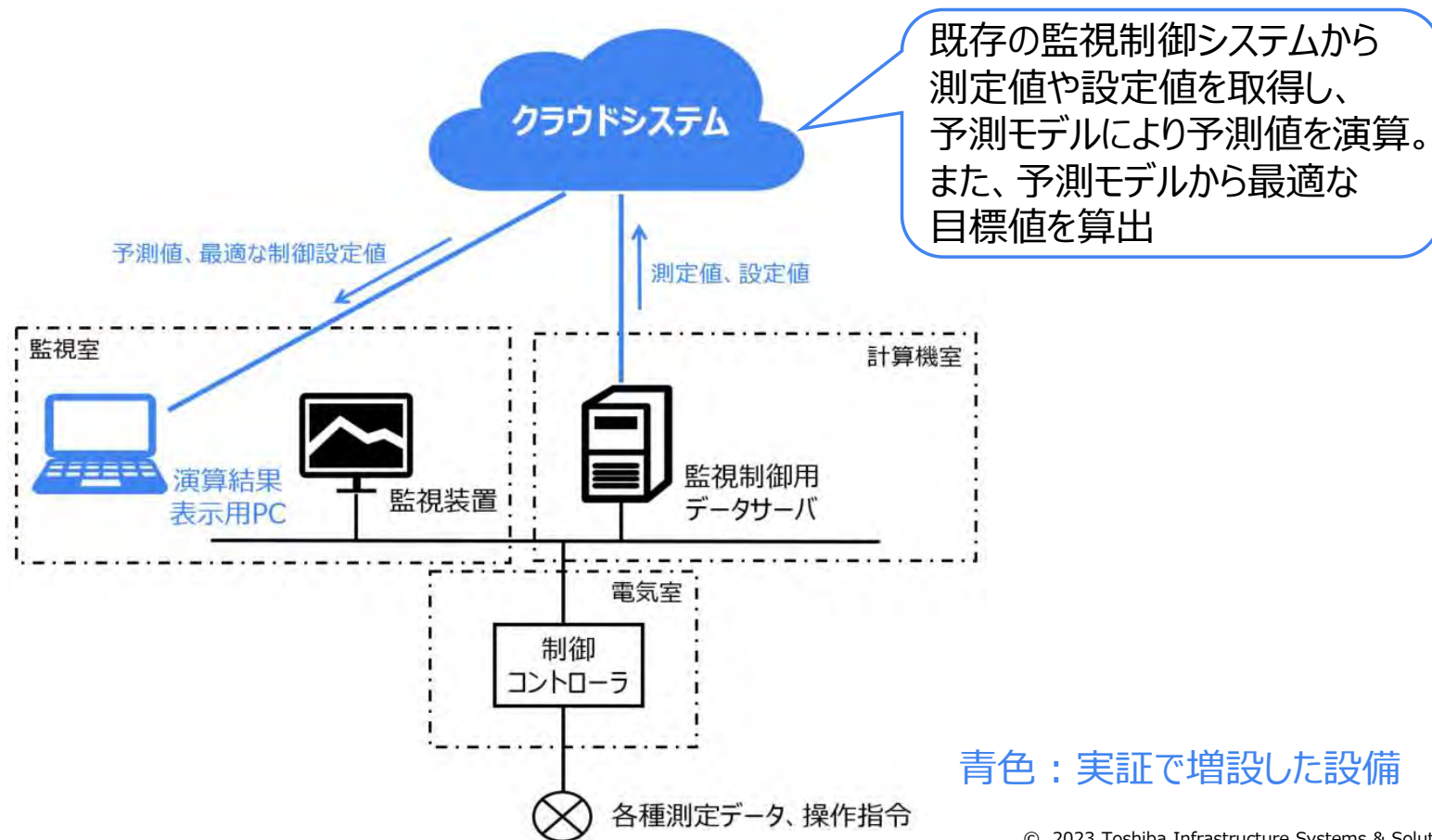
# 実証研究の概要 – 実証する技術（塩素注入の最適化） –

原水水質、塩素注入率から**処理水質予測モデル**により、**残留塩素濃度を予測**。この予測モデルを用いて**最適な塩素注入率を演算**。



## 実証するシステム概要

クラウドシステムで既存の監視制御システムから測定値や設定値を取得し、予測モデルにより予測値を演算する。また、予測モデルから最適な制御設定値を算出する。予測値および最適な制御設定値を演算結果表示用PC(本実証用として新規設置)へ表示することでオペレータへ情報提供する。





## 実証試験内容

本実証試験では、各モデル（塩素消費モデル、ソフトセンシング）をオフラインで検証し、現地実証試験ではオンラインでそのモデルによる残留塩素濃度の予測値と塩素注入率の最適値の演算結果の有効性を評価する。

研究目標		水質計器による計測値、日射・紫外線量およびAIによるソフトセンシングを用いた塩素消費ハイブリッドモデルによる塩素消費量予測技術の構築と、塩素消費量予測に基づく塩素注入最適値演算手法の確立。
確認項目①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証（オフライン検証）	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費量演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
確認項目②	AIによるソフトセンシングモデルの検証（オフライン検証）	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と手分析結果を比較し、最適なモデル構成およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
確認項目③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価（現地実証試験）	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動による影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。

## 水道技術向上への寄与度 – 開発技術が提供する価値 –

本研究により、塩素の消費モデルに基づき、**最適な塩素注入率を自動で決定する技術**を提供する。  
処理水質の予測モデルを活用することで将来の水質変動を示し、**熟練度に依存しない判別**手段を提供する。



オペレータの負担減少



薬品のコスト減



スキル継承高齢化対策

これら価値を提供することで、水道技術の向上に寄与する

# 研究のスケジュール

2020年3月にクラウドシステムと監視制御システムを接続し、残留塩素の予測値および管理目標値以上となる塩素注入率の最適な制御設定値の演算を始めることで現地実証を開始。オペレータへ演算結果を表示するための汎用PCを同年6月に設置。2021年1月にPC表示用GUIを改良、2021年11月、2022年7月に予測モデルを改良。2022年11月に塩素注入率の最適な制御設定値の演算値での運用により実機場検証を実施。



# 02

## 実証試験設備の概要



# 長野市上下水道局 犀川浄水場の概要

犀川浄水場は、水源を犀川表流水（ダム水）と伏流水とする浄水場で、長野市最大の浄水場。



出展：長野市上下水道局犀川浄水場のパンフレット



公称浄水能力：64,220m<sup>3</sup>/日

水源：犀川表流水（ダム水）30,800m<sup>3</sup>/日  
※2022年12月現在 ※富栄養化の進行も少なく、定常時の水質は臭気の発生も僅かで良好  
伏流水 33,420m<sup>3</sup>/日  
※表流水高濁時等は伏流水のみで運用

浄水方法：薬品沈澱急速ろ過方式  
前塩素 + 中塩素注入（後塩素なし）

## 長野市上下水道局 犀川浄水場の概要

○実証試験期間\*における表流水（取水口ピット）の水質

項目	水温 (°C)	PH (-)	濁度 (度)	色度 (度)	アルカリ度 (mg/L)	TOC (mg/L)	鉄 (mg/L)	マンガン (mg/L)	アンモニア性 窒素(mg/L)
最大値	24.7	8.74	1958	29	46.6	1.4	1.67	0.084	0.182
最小値	3.2	6.62	1.1	1.1	16.6	0.6	0.06	0.012	0
中央値	13.4	7.51	5.8	4.3	33.5	0.7	0.24	0.018	0.013

\*水温、pH、濁度、アンモニア性窒素は2020、2021年度のオンラインデータ、色度、TOC、鉄、マンガンは2020年度水質年報データ

○表流水、伏流水の取水量

	2020年度	2021年度
表流水	5,124,730m <sup>3</sup> (50.5%)	4,763,036m <sup>3</sup> (50.0%)
伏流水	5,027,761m <sup>3</sup> (49.5%)	4,766,388m <sup>3</sup> (50.0%)

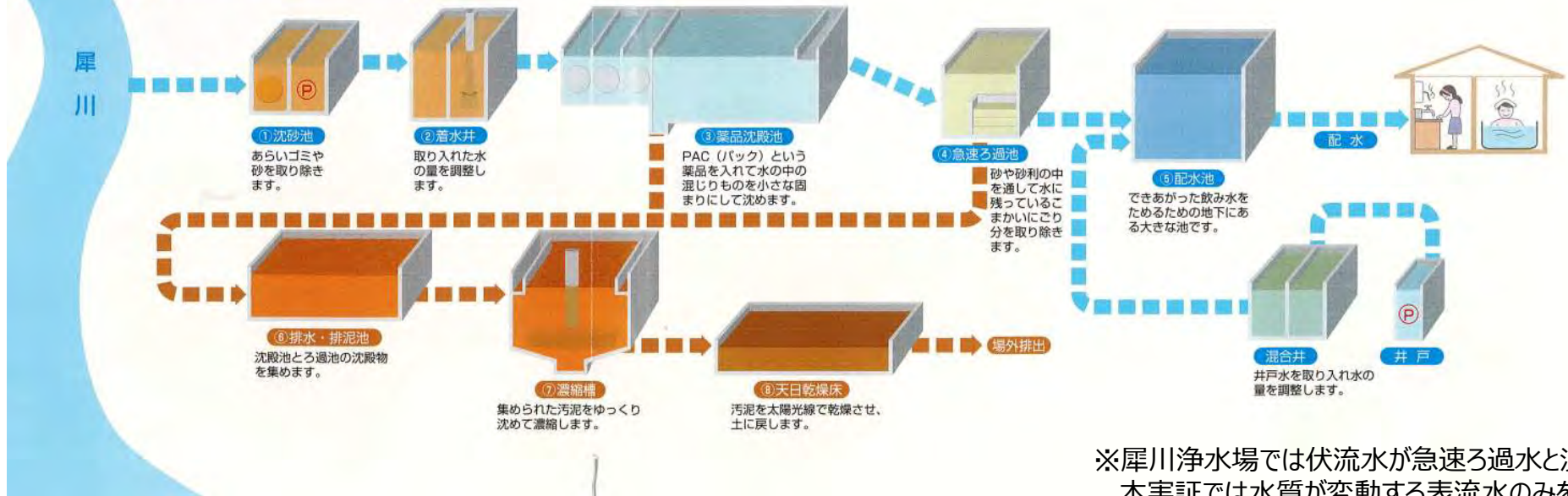
○表流水と伏流水の取水に関する運用

- ・基本的に表流水を取水
- ・高濁時等は伏流水を取水

# 犀川浄水場の処理フロー



## 水道水のできるまで

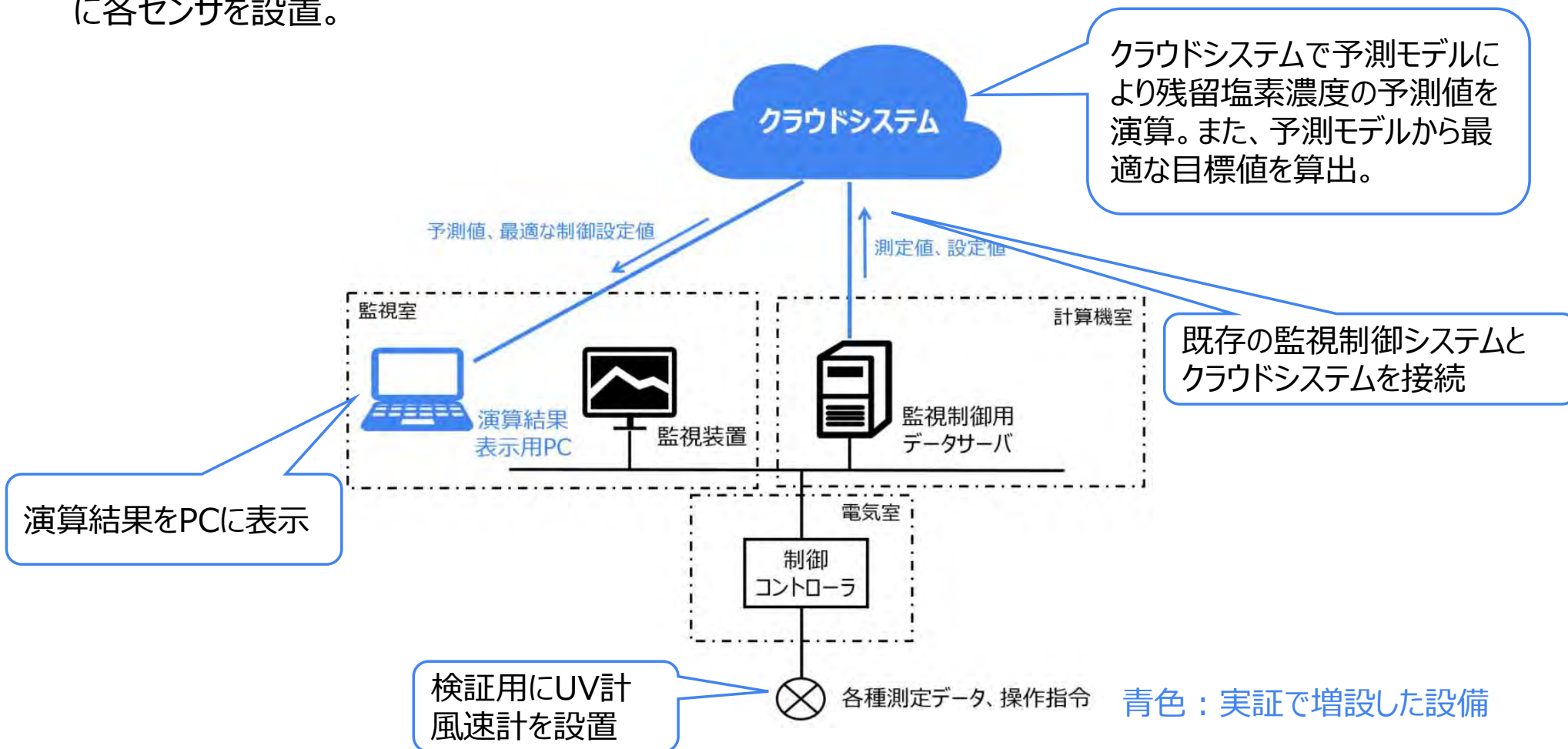


※犀川浄水場では伏流水が急速ろ過水と混合するが、本実証では水質が変動する表流水のみを対象とした



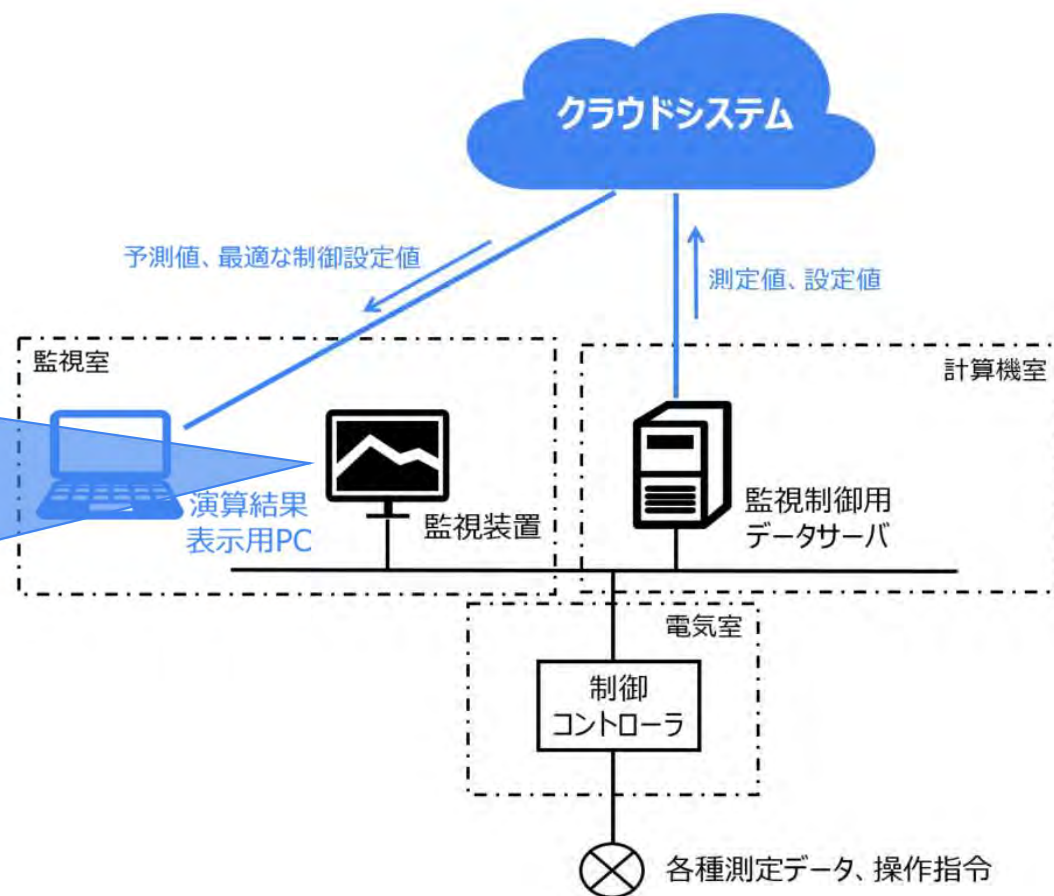
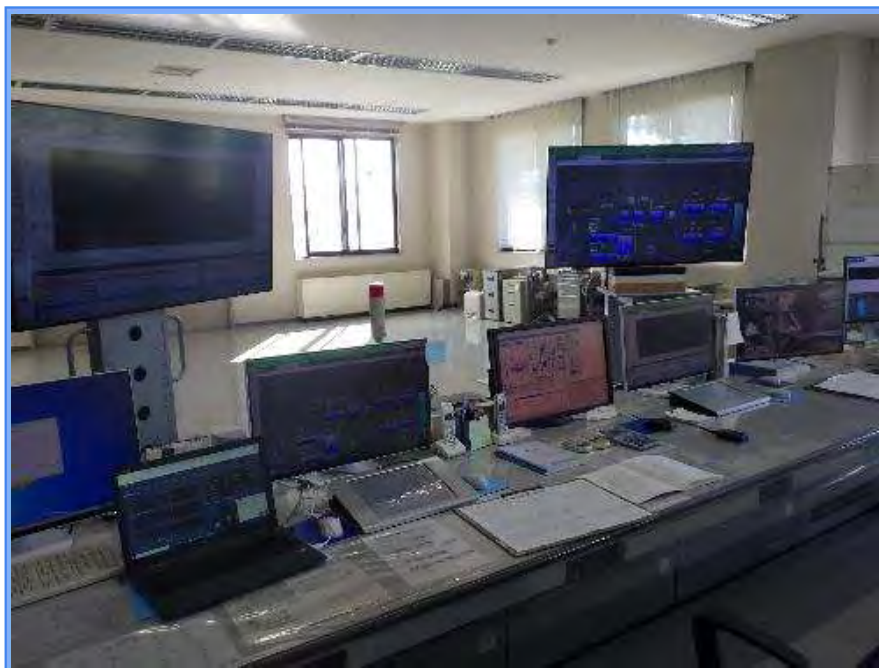
## 実証試験設備の概要 – 実証するシステム –

実証用に既存の監視制御システムとクラウドシステムを接続。また、演算結果表示用にPCを、予測モデル検証用に各センサを設置。



## 実証試験設備の概要 – 既存の監視制御システム –

実証用に既存の監視制御システムとクラウドシステムを接続。また、演算結果表示用にPCを、予測モデル検証用に各センサを設置。



### 監視装置

犀川浄水場の全プロセスを監視する監視制御システム。実証研究では、本監視制御システムとクラウドシステムをVPNを介して接続。クラウドシステムはこのネットワークより浄水場の各計測値や設定を取得。

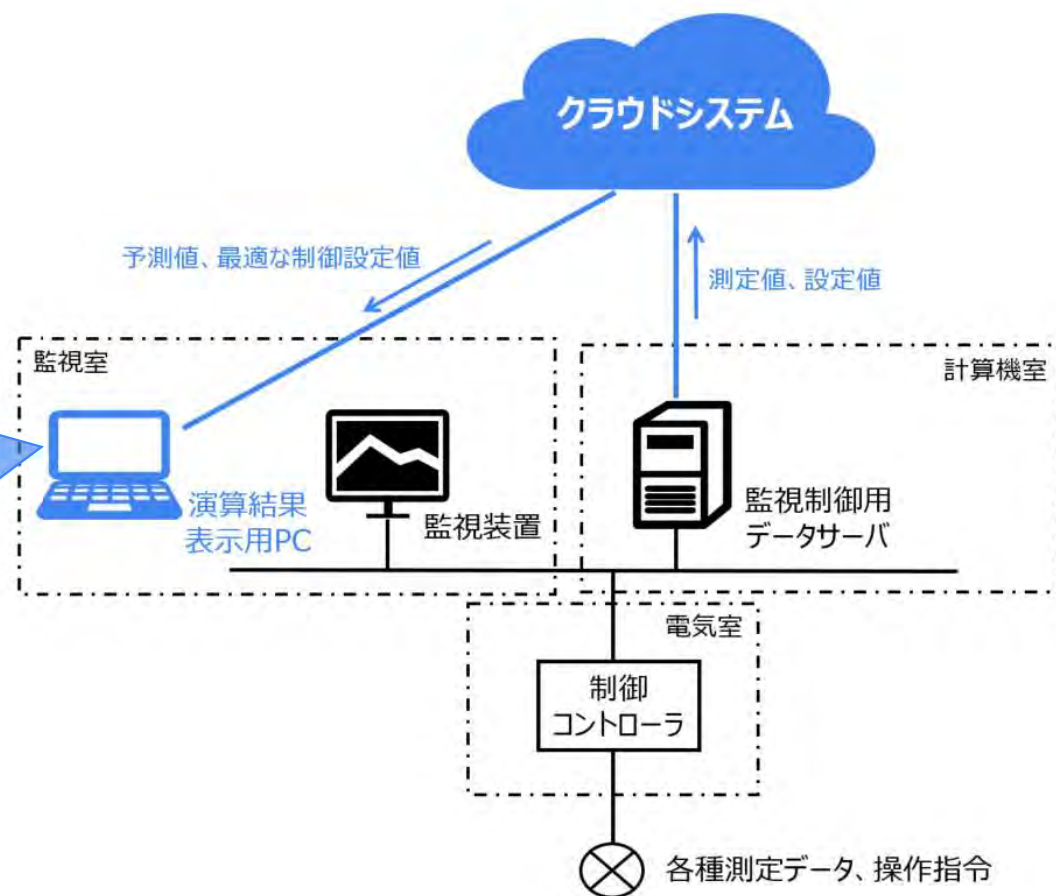
## 実証試験設備の概要 – 演算結果表示用PC –

実証用に既存の監視制御システムとクラウドシステムを接続。また、演算結果表示用にPCを、予測モデル検証用に各センサを設置。



### 演算結果表示用PC

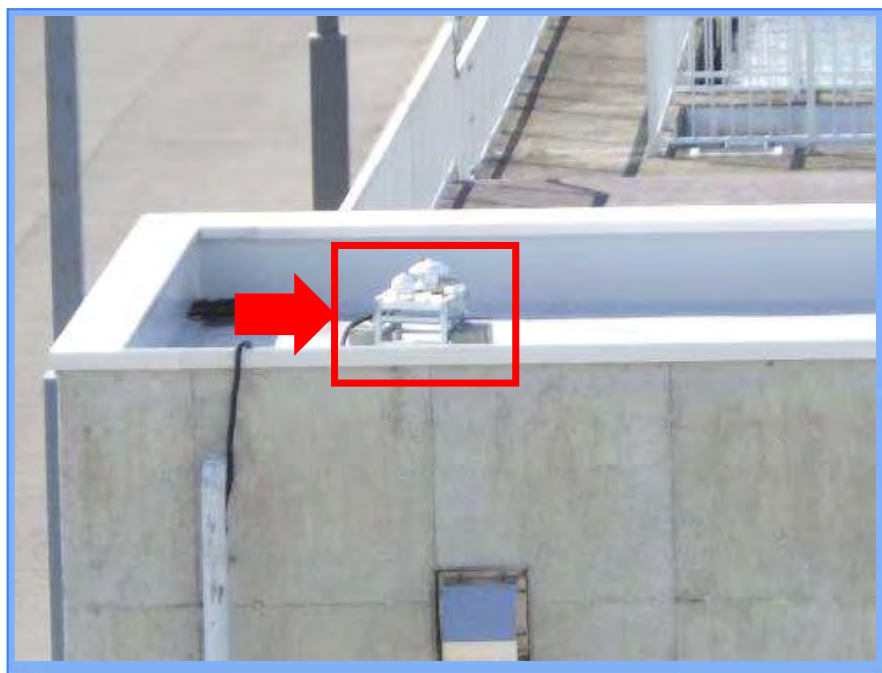
クラウドシステムにて演算した**残留塩素濃度の予測値**や**塩素注入率の最適な設定値**をGUI上に表示。





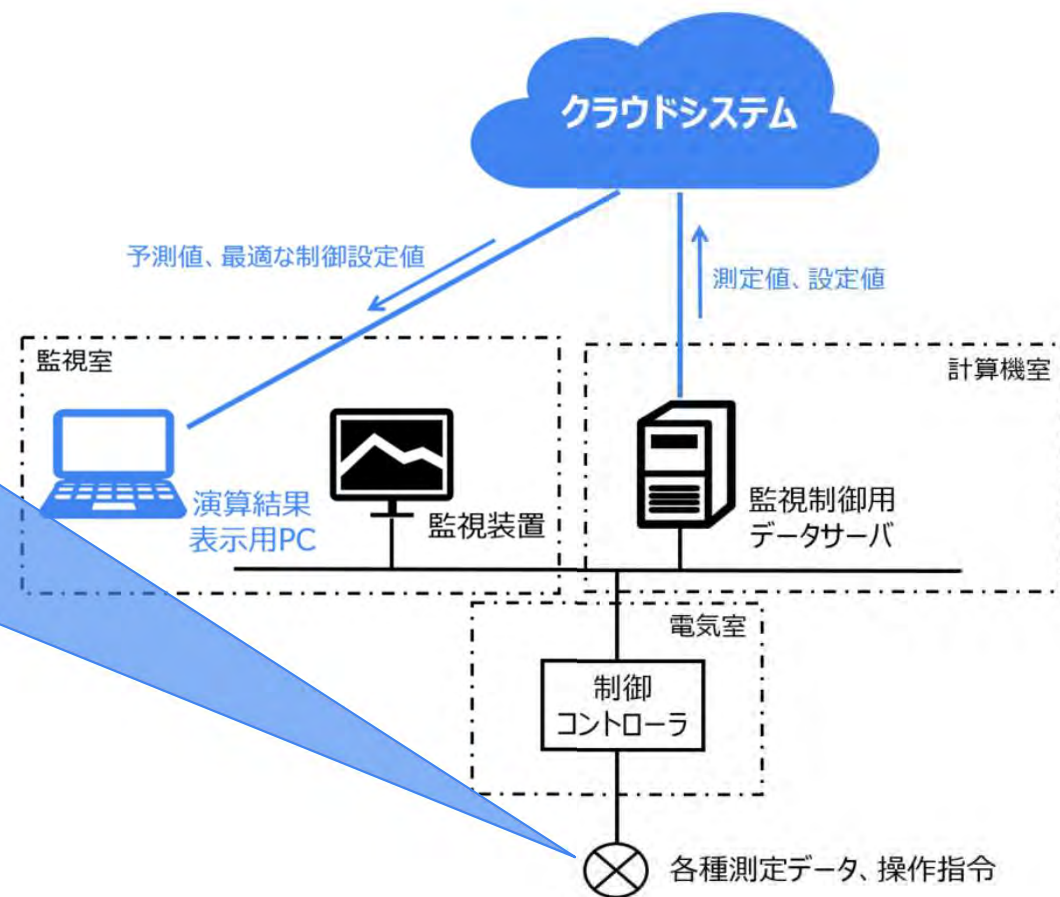
## 実証試験設備の概要 – 計測設備（UV計）の設置 –

実証用に既存の監視制御システムとクラウドシステムを接続。また、演算結果表示用にPCを、予測モデル検証用に各センサを設置。



### UV計の設置

塩素消費へのUVの影響を把握するために、UV計を設置。UVのデータをコントローラへ入力し、監視制御サーバを介してクラウドシステムで取得。



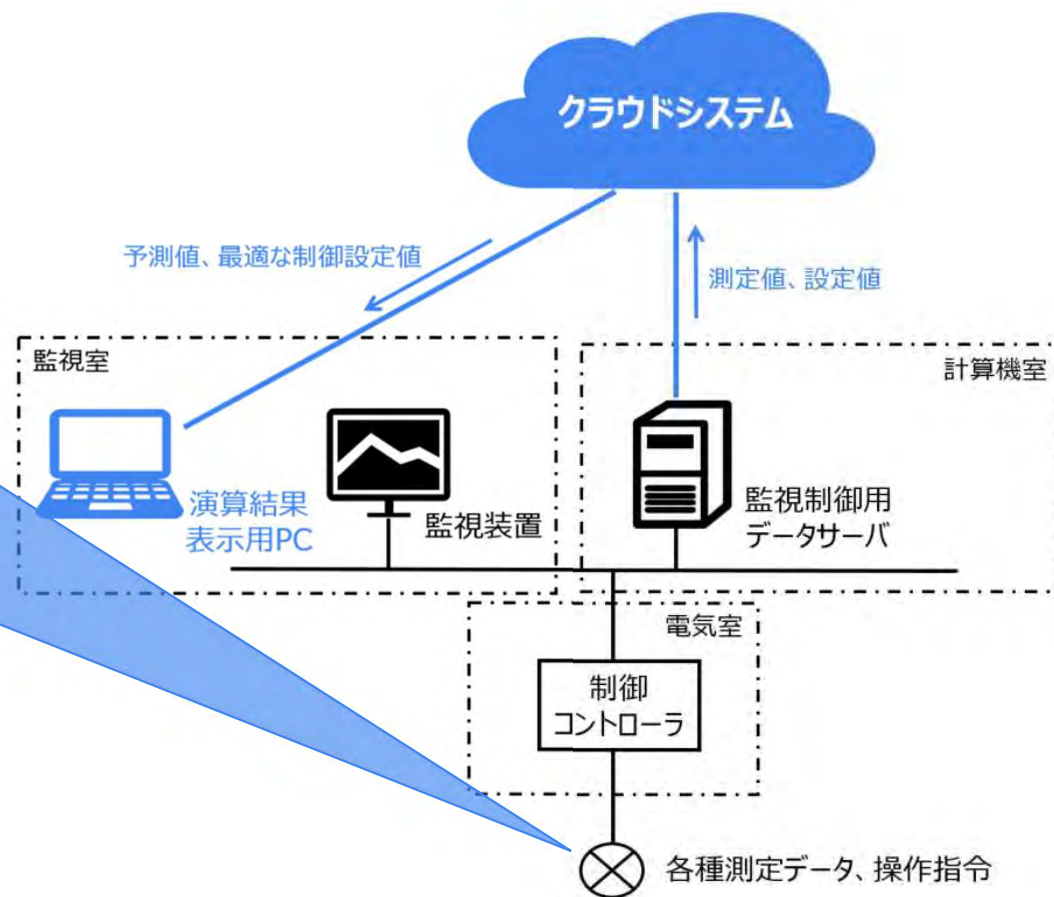
## 実証試験設備の概要 – 計測設備（風速計）の設置 –

実証用に既存の監視制御システムとクラウドシステムを接続。また、演算結果表示用にPCを、予測モデル検証用に各センサを設置。



### 風速計の設置

塩素消費への風速の影響を把握するために、風速計を設置。風速のデータをコントローラへ入力し、監視制御サーバを介してクラウドシステムで取得。





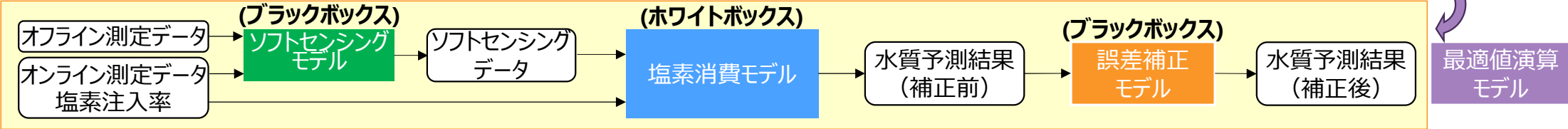
# 03

## 最適化技術の概要

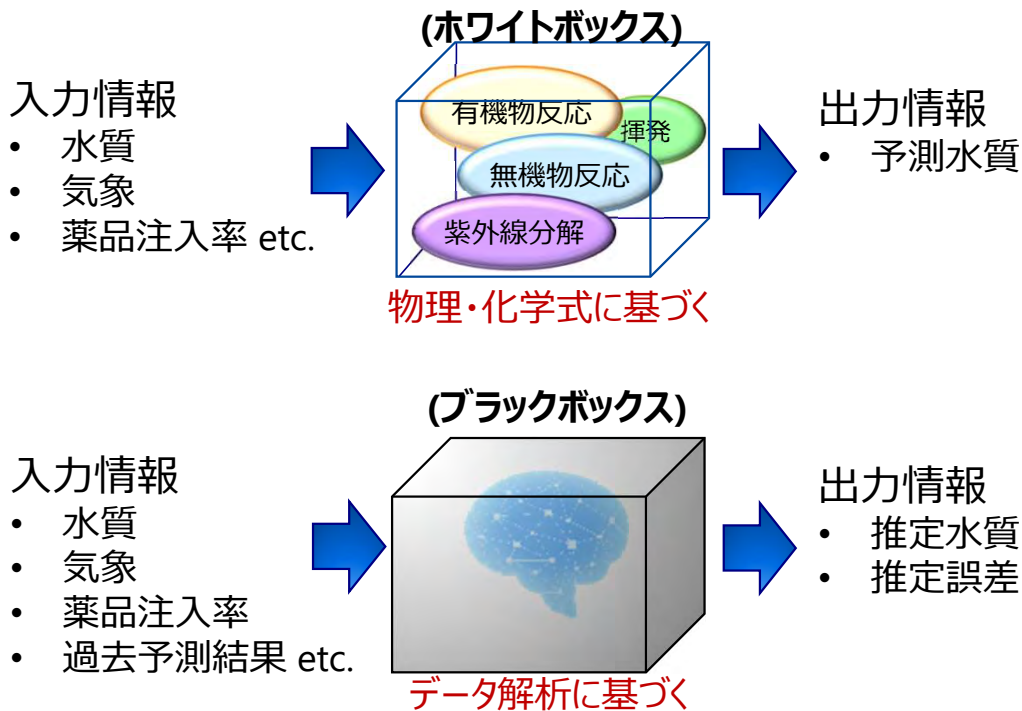
### －残留塩素濃度予測モデルと最適演算の内容－

# 残留塩素濃度予測モデルと最適演算の概要

## 残留塩素濃度予測モデル



## ブラックボックスとホワイトボックスの違い



## 各モデルの役割

### 塩素消費モデル (ホワイトボックス)

塩素消費に関する物理式・化学反応速度式を統合し、塩素との接触時間（滞留時間）に対する残留塩素濃度予測値を出力する。

### ソフトセンシングモデル (ブラックボックス)

塩素消費モデルの入力となる原水水質項目の内、オンラインで取得されていないものを、他のオンライン情報から推定し、リアルタイム値として出力する。

### 誤差補正モデル (ブラックボックス)

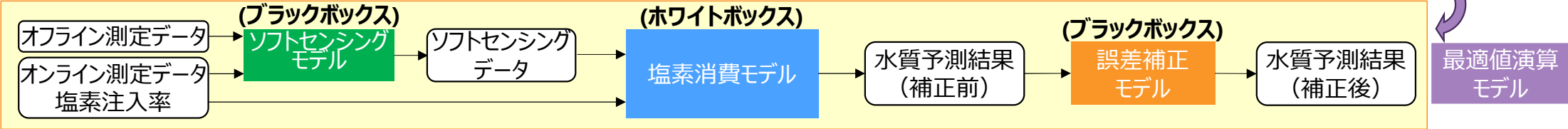
塩素消費モデル上で実装されていない未知の影響や機場特性を、過去実績との予測誤差に基づき補正する。

### 最適値演算モデル

沈澱池/ろ過池/浄水池の残留塩素濃度管理値を満たす、最小の前/中/後塩素注入率を求め、コスト最適化を図る。

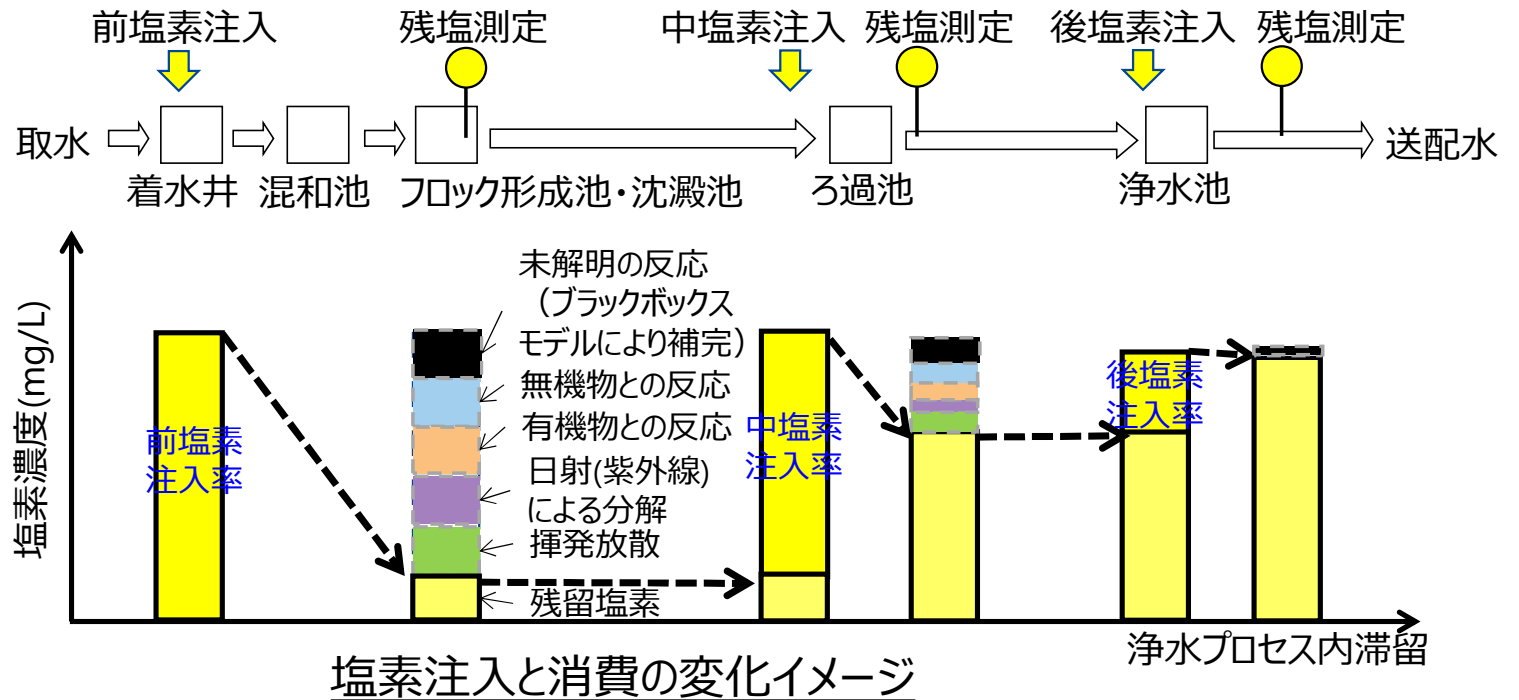
# 残留塩素濃度予測モデルと最適演算 – 塩素消費モデル（ホワイトボックスモデル） –

## 残留塩素濃度予測モデル



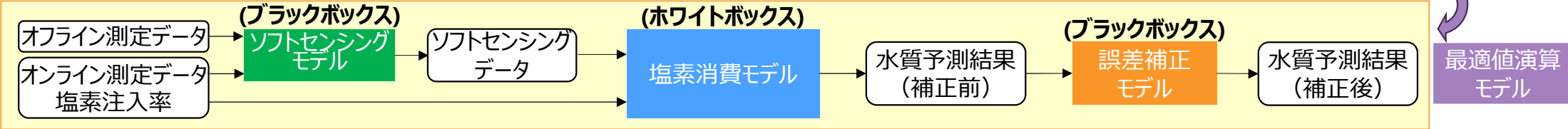
### 塩素消費モデル (ホワイトボックス)

塩素消費に関する物理式・化学反応速度式を統合し、塩素との接触時間（滞留時間）に対する残留塩素濃度予測値を出力する。



# 残留塩素濃度予測モデルと最適演算 – ソフトセンシングモデル（ブラックボックスモデル） –

## 残留塩素濃度予測モデル



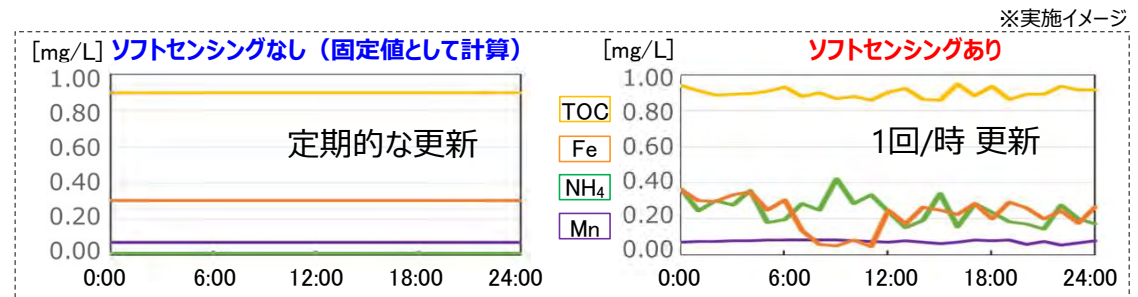
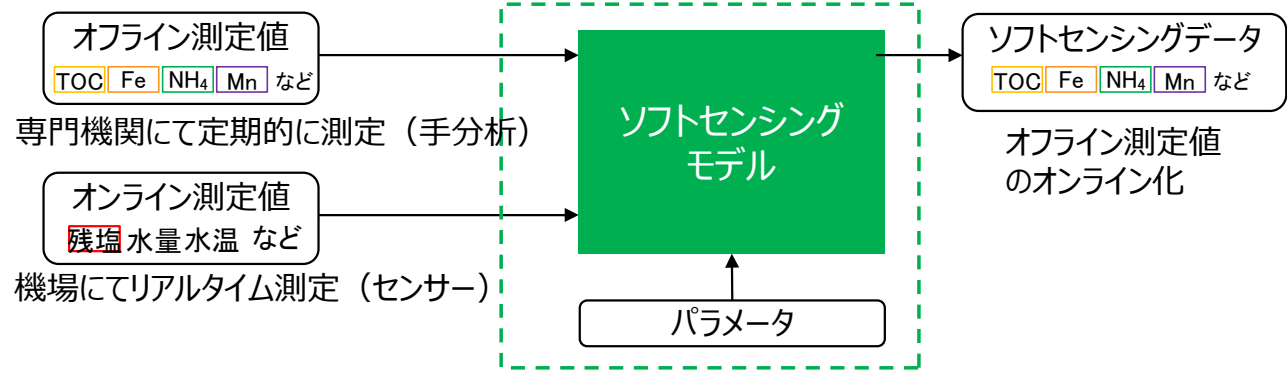
### ソフトセンシングモデル（ブラックボックス）

塩素消費モデルの入力となる原水水質項目の内、オンラインで取得されていないものを、他のオンライン情報から推定し、リアルタイム値として出力する。

手分析でのみ測定している水質値(TOC等)を、定期的な手分析結果およびオンライン測定値より推定する。

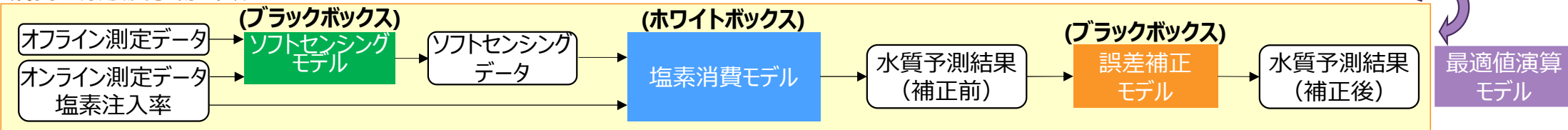
リアルタイム値として出力することにより、塩素消費モデルによる予測性能の向上を図る。

### AIによる推定



# 塩素消費モデルと最適演算 – 誤差補正モデル（ブラックボックスモデル） –

## 残留塩素濃度予測モデル

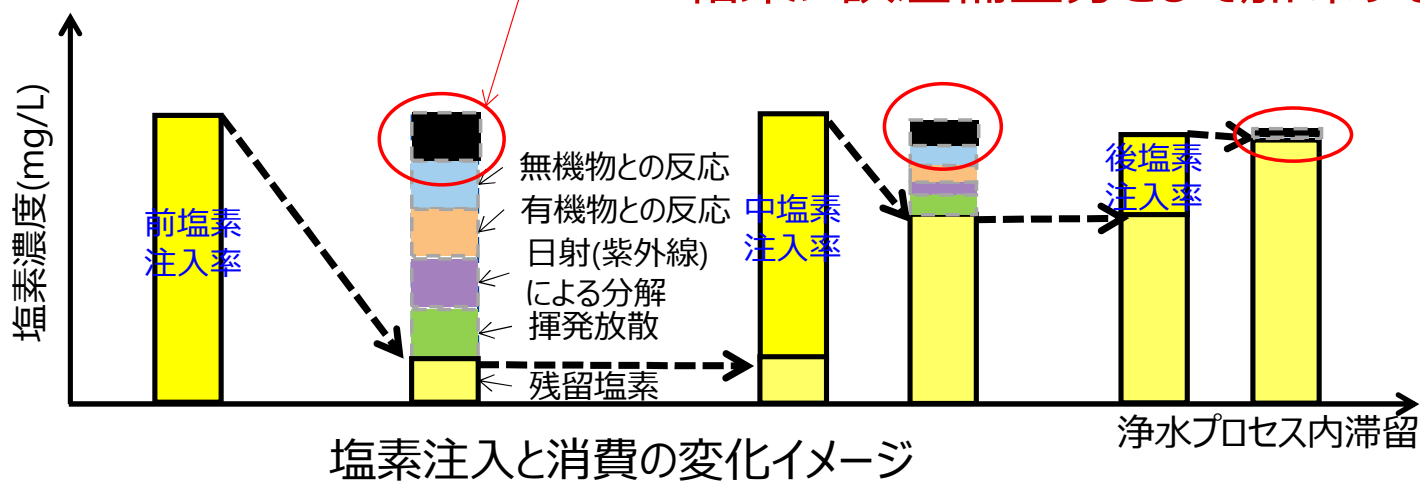


### 誤差補正モデル（ブラックボックス）

塩素消費モデル上で実装されていない未知の影響や機場ごとの特性を、過去実績との予測誤差に基づき補正する。

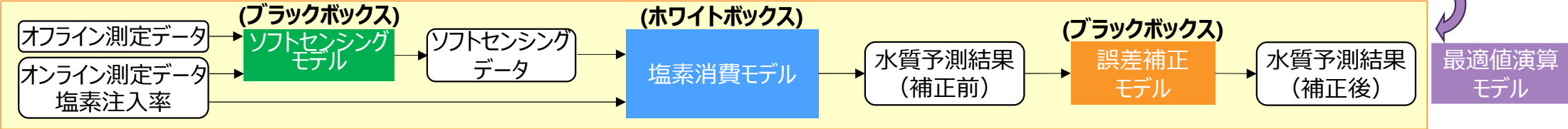
### 未解明の反応

⇒ 過去の残留塩素濃度予測結果と実際の値との差分を学習し、現在の残留塩素濃度予測結果に誤差補正分として加味する。



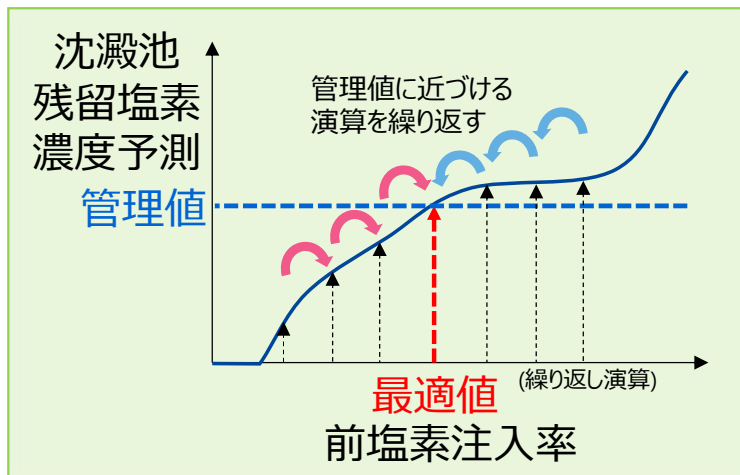
# 残留塩素濃度予測モデルと最適演算 – 最適値演算モデル –

## 残留塩素濃度予測モデル

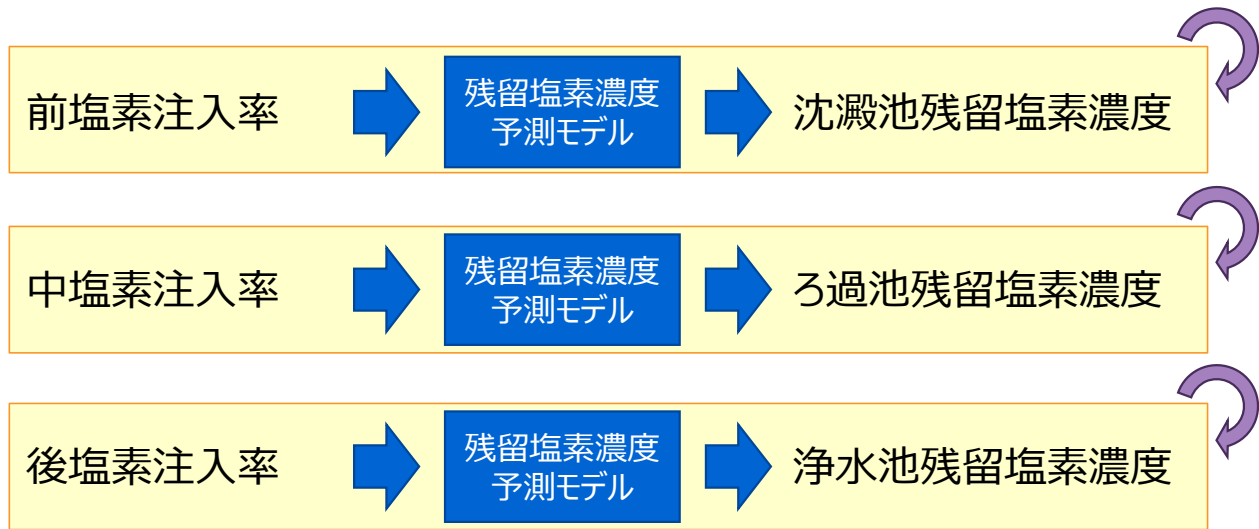


## 最適値演算モデル

沈澱池/ろ過池/浄水池の残留塩素濃度管理値を満たす、最小の前/中/後塩素注入率を求め、コスト最適化を図る。



残留塩素濃度予測モデルによる演算結果



**繰り返し演算し、管理値を満たす最小の塩素注入率を求める**

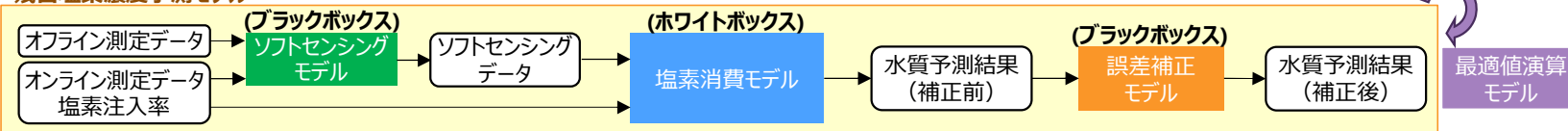
# 04

## 確認項目①

原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証（オフライン検証）

# 研究目標および確認項目

残留塩素濃度予測モデル



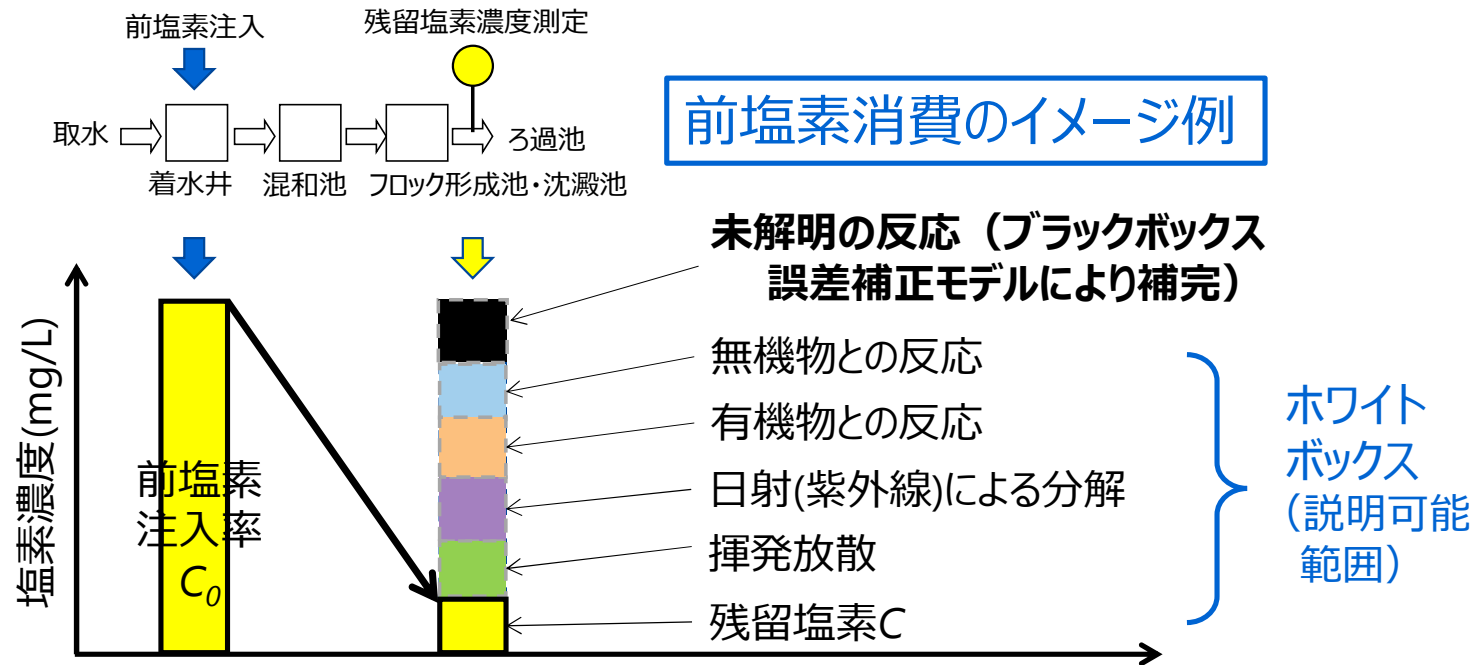
研究目標		水質計器による計測値、日射・紫外線量およびAIによるソフトセンシングを用いた塩素消費ハイブリッドモデルによる塩素消費量予測技術の構築と、塩素消費量予測に基づく塩素注入最適値演算手法の確立。
確認項目 ①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証 (オフライン検証)	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費量演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
確認項目 ②	AIによるソフトセンシングモデルの検証 (オフライン検証)	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と手分析結果を比較し、最適なモデル構成およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
確認項目 ③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価 (現地実証試験)	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動による影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。



# 塩素消費モデルの想定（ホワイトボックスモデル）

## 原水中の成分及び環境条件による塩素消費のイメージ

前塩素例) 着水井で注入された塩素が、原水中の無機・有機成分との反応、およびフロック形成池・沈澱池での日射による分解、揮発等で減少していき、残った塩素が沈澱池出口の残留塩素濃度として計測されることを想定

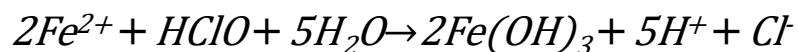


$$C = C_0 - f(\text{無機物}) - f(\text{有機物}) - f(\text{日射}) - f(\text{揮発放散}) - \text{未解明}$$

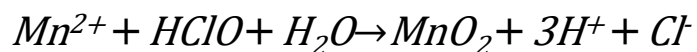
## ホワイトボックスモデルの検討（無機物との反応）

原水中に含まれ、次亜塩素酸と反応する代表的無機成分を選定し、反応式からモデルを立案

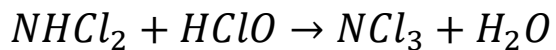
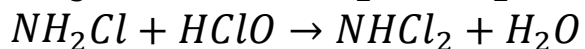
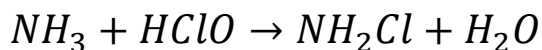
<代表的な無機成分と次亜塩素酸の反応式>  
(鉄イオン)



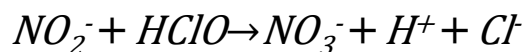
(マンガンイオン)



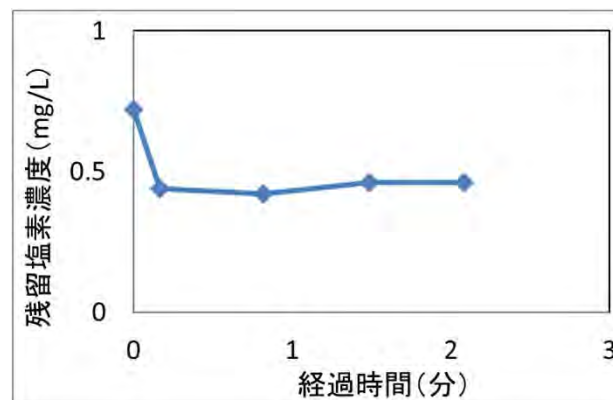
(アンモニアイオン)



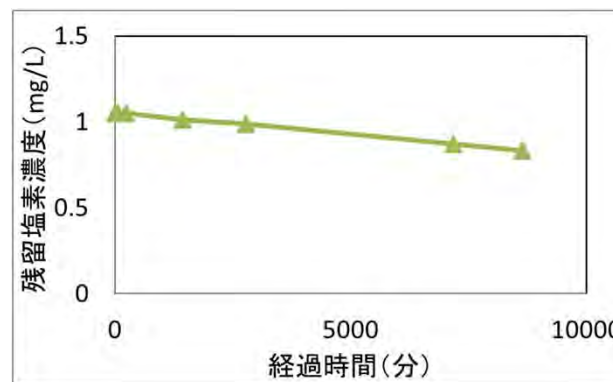
(亜硝酸イオン)



- ・ラボ試験にて、各無機物との反応速度を測定し、モデルに反映
- ・塩素注入後の経過時間(浄水プロセス内滞留時間)に対する塩素の消費を演算



Fe<sup>2+</sup>による塩素消費

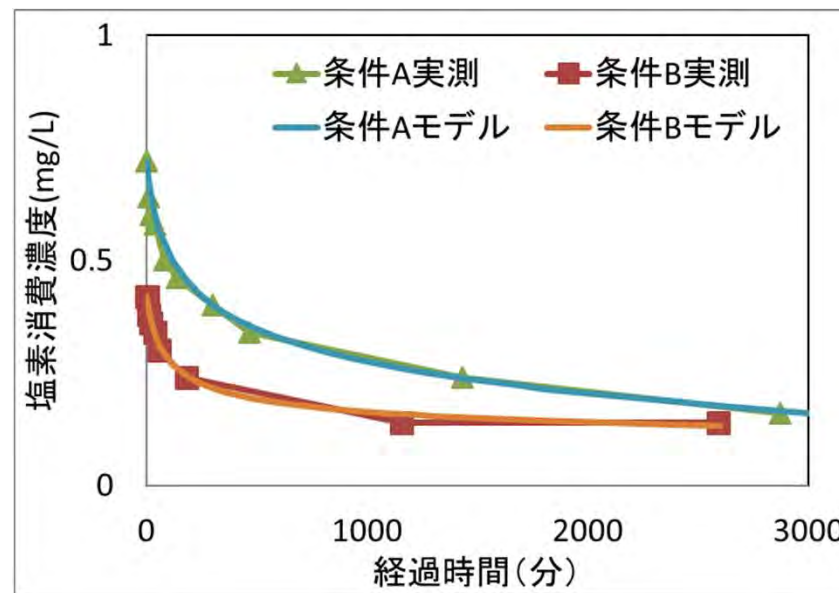


Mn<sup>2+</sup>による塩素消費

## ホワイトボックスモデルの検討（有機物との反応）

有機物との反応については、緩・急の反応速度をもつ二段階反応を想定し、二次反応の和としてモデル化

- ・市販フミン酸水溶液のラボ実験の実測値と比較しモデルを確認
- ・異なる2条件での測定結果と、緩・急ハイブリッドモデルがほぼ一致



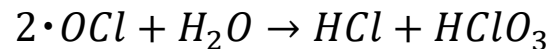
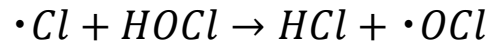
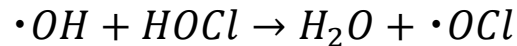
有機物（フミン酸）による塩素消費

条件A：塩素注入率高  
条件B：塩素注入率低

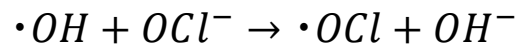
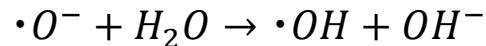
# ホワイトボックスモデルの検討（紫外線による分解）

## 紫外線吸収量から次亜塩素酸の分解を算出するモデルを立案

<次亜塩素酸HOCl分解に関する反応式> Feng<sup>5</sup>(2007)



<次亜塩素酸イオンOCl<sup>-</sup>分解に関する反応式>



次亜塩素酸（HClO、ClO<sup>-</sup>）の光分解一次反応式

$$\ln(C_F/C_0) = \Sigma(-k_\lambda \cdot F_\lambda)$$

$$\ln(C_F) = \ln(C_0) - \Sigma(k_\lambda \cdot F_\lambda)$$

$C_F$ : 照射t時間後の次亜塩素酸濃度(mg/L)、

$C_0$ : 紫外線照射前の次亜塩素酸濃度(mg/L)、

$k_\lambda$ : 各波長の一次反応速度定数(m<sup>2</sup>/J)、 $F_\lambda$ : 各波長の紫外線照射量(J/m<sup>2</sup>)

第32回環境システム計測制御学会研究発表会より

# ホワイトボックスモデルの検討（紫外線による分解）

各波長における一次反応速度定数 $k_\lambda$

$$k_\lambda = \Phi \cdot \varepsilon_\lambda \cdot \ln(10) / (10U_\lambda)$$

$U_\lambda$ :各波長における光量子のエネルギー(J/Einstein)  $\Phi$ :量子効率(-)

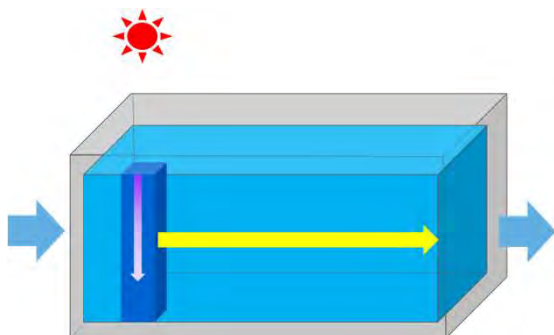
$\varepsilon_\lambda$ :各波長における次亜塩素酸の紫外線モル吸収係数(-)

ランベルト・ベールの法則により、水深に応じた水分子による紫外線吸収を減衰率として考慮

水深 $z$ における紫外線強度 $I_z$   $I_z = I_0 \exp(-c_\lambda z)$

$I_z$ :水深 $z$ での紫外線強度(mW/m<sup>2</sup>)、 $I_0$ :水面紫外線強度(mW/m<sup>2</sup>)、

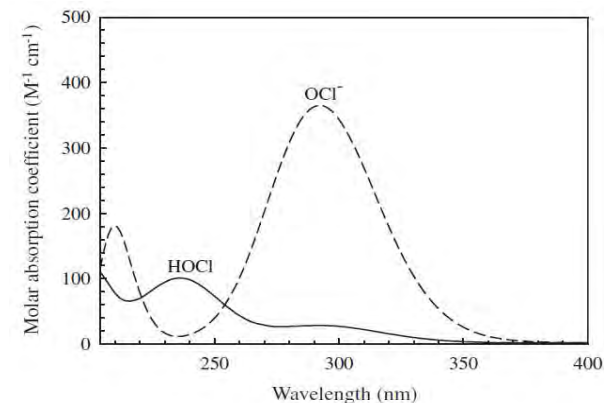
$c_\lambda$ :各波長における光吸収係数(-)、 $z$ :水深(m)



紫外線を吸収しながら水が水槽を移動していくイメージ

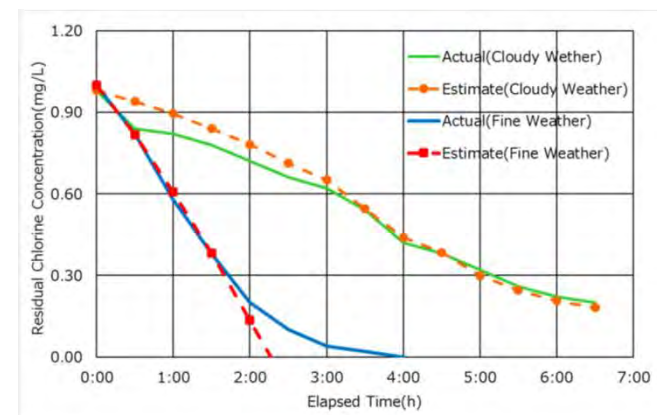


浄水場に設置した紫外線計でデータ取得



各波長のモル吸収係数

Fengら(2007)



ラボでの紫外線分解モデル検証

## ホワイトボックスモデルの検討（揮発放散）

### 着水井越流堰落下における揮発放散を確認

上部開放で流速が速く、落下後の発泡も揮発放散を促進していると考えられた。

⇒越流堰前後の採水分析を実施、越流堰における気泡巻き込みによる揮発モデルを立案



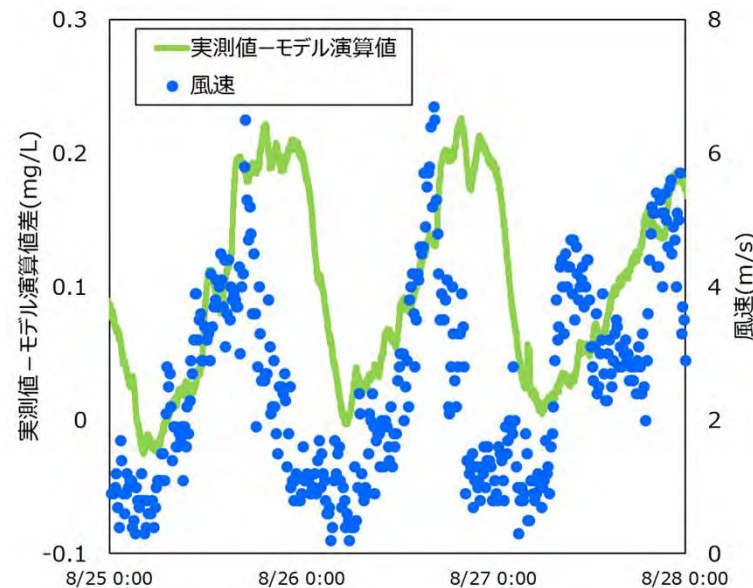
着水井越流堰と混和池へつなぐ開渠



# ホワイトボックスモデルの検討（揮発放散）

## 風速の変化に伴う次亜塩素酸の揮発放散を調査・検討

- ・沈澱池において、原水水質と紫外線による塩素消費モデルの演算結果と実測値（沈澱池入口残塩－沈澱池出口残塩）との差の時間変動は、長野市平均風速の変化と類似
- ⇒浄水場に風速計を設置しデータ取得



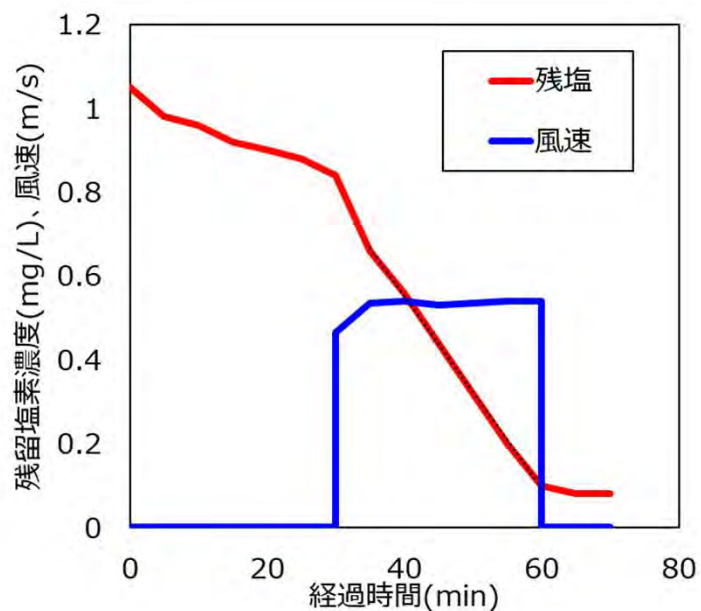
実測値-塩素消費モデル(揮発モデル導入前)差と風速の時間変化

令和3年度全国水道研究発表会投稿原稿より

# ホワイトボックスモデルの検討（揮発放散）

## ラボ実験により風速による残留塩素濃度低下の促進を確認

- ・送風時に残留塩素濃度の低下速度増加を確認（風速が大きいほど低下）
- ・沈澱池における実測値とモデル値差と風速の関係、ラボ実験の結果をもとに、風速を主要パラメータとした揮発放散モデルを立案



風速と残留塩素濃度の低下速度の結果一例

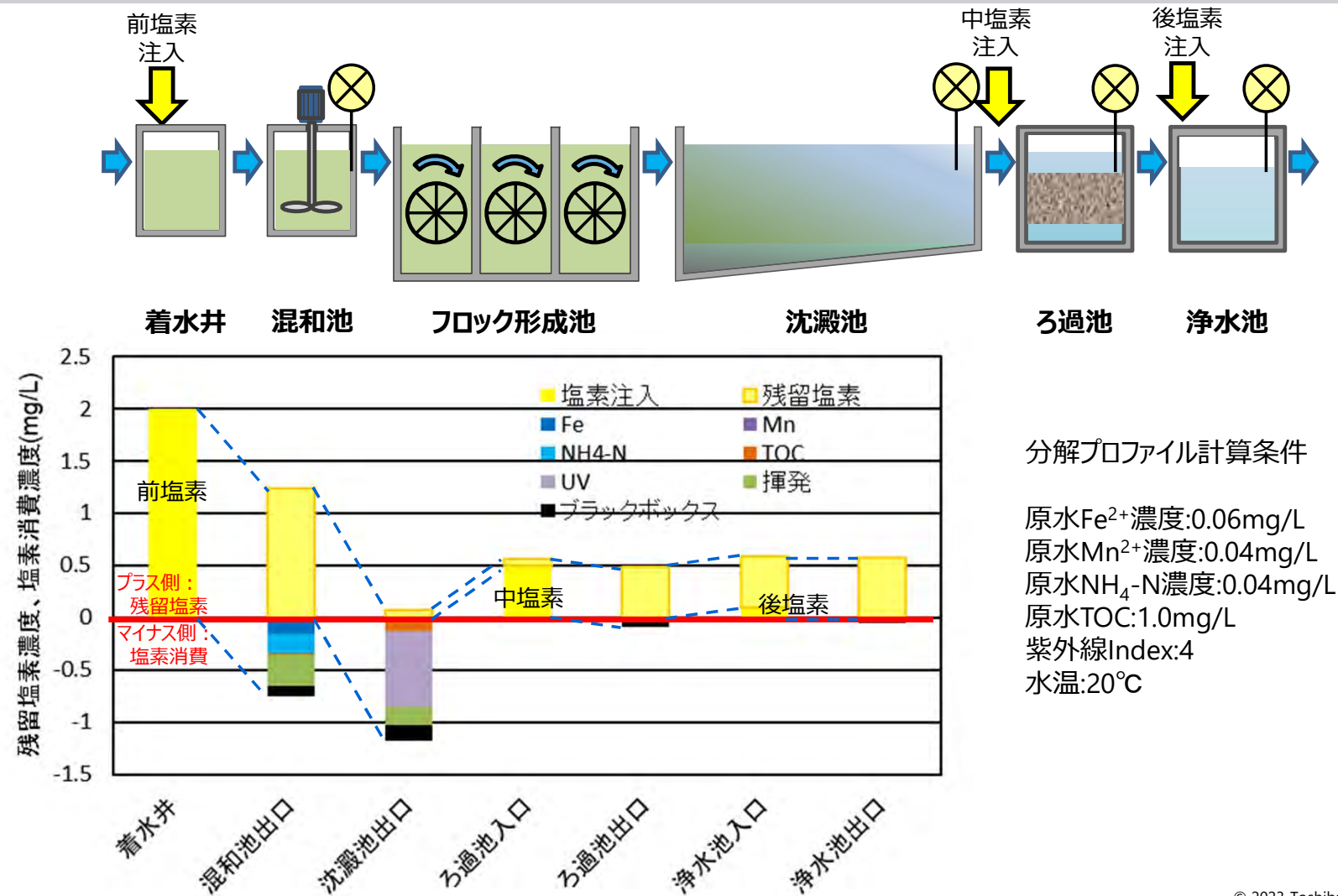


風速に対する塩素揮発のラボ実験

令和3年度全国水道研究発表会  
投稿原稿より



# ホワイトボックスモデルの検討（分解プロフィール試算例）



## 本章まとめ

研究目標		実施項目と成果
確認項目 ①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証 (オフライン検証)	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応、および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
成果	塩素消費物理・化学(ホワイトボックス)モデルを立案し検証	<ul style="list-style-type: none"><li>・無機物、有機物との反応、紫外線による分解、揮発放散による消失モデルを組合せ、塩素消費ホワイトボックスモデルを立案し、実測値と比較・検証</li><li>・塩素注入率に対し、滞留時間に基づいて各ポイントにおける残留塩素濃度の予測値が算出可能となった。</li></ul>

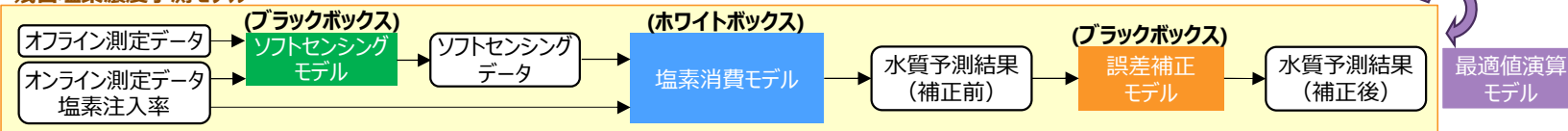
# 05

## 確認項目②

### AIによるソフトセンシングモデルの検証（オフライン検証）

# 研究目標および確認項目

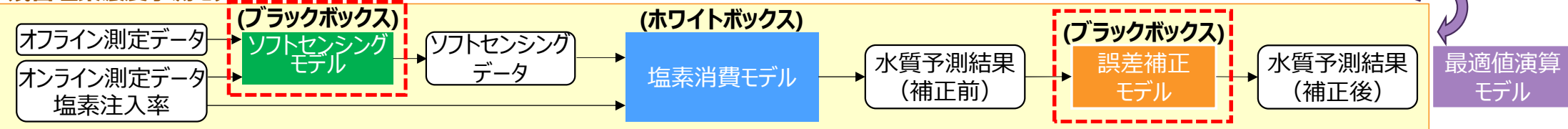
残留塩素濃度予測モデル



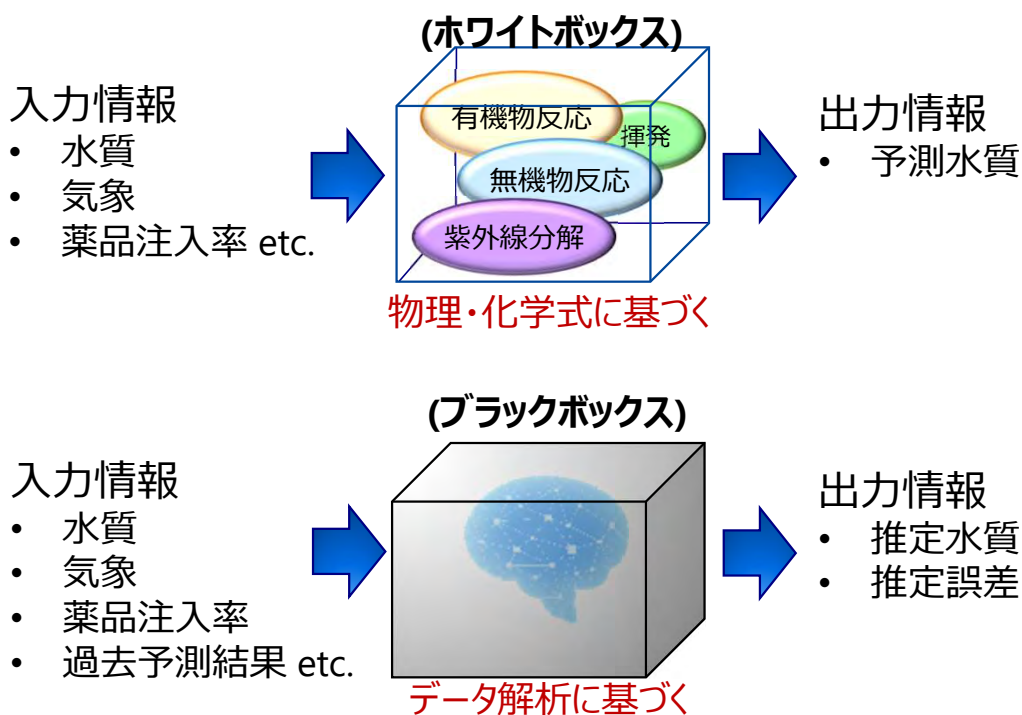
研究目標		水質計器による計測値、日射・紫外線量およびAIによるソフトセンシングを用いた塩素消費ハイブリッドモデルによる塩素消費量予測技術の構築と、塩素消費量予測に基づく塩素注入最適値演算手法の確立。
確認項目 ①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証 (オフライン検証)	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費量演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
確認項目 ②	AIによるソフトセンシングモデルの検証 (オフライン検証)	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と採水分析結果を比較し、最適なモデル構成およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
確認項目 ③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価 (現地実証試験)	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動による影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。

# 本章における検証モデル

## 残留塩素濃度予測モデル



## ブラックボックスとホワイトボックスの違い



## 各モデルの役割

### 塩素消費モデル (ホワイトボックス)

塩素消費に関する物理式・化学反応速度式を統合し、塩素との接触時間（滞留時間）に対する残留塩素濃度予測値を出力する。

### ソフトセンシングモデル (ブラックボックス)

塩素消費モデルの入力となる原水水質項目の内、オンラインで取得されていないものを、他のオンライン情報から推定し、リアルタイム値として出力する。

### 誤差補正モデル (ブラックボックス)

塩素消費モデル上で実装されていない未知の影響や機場特性を、過去実績との予測誤差に基づき補正する。

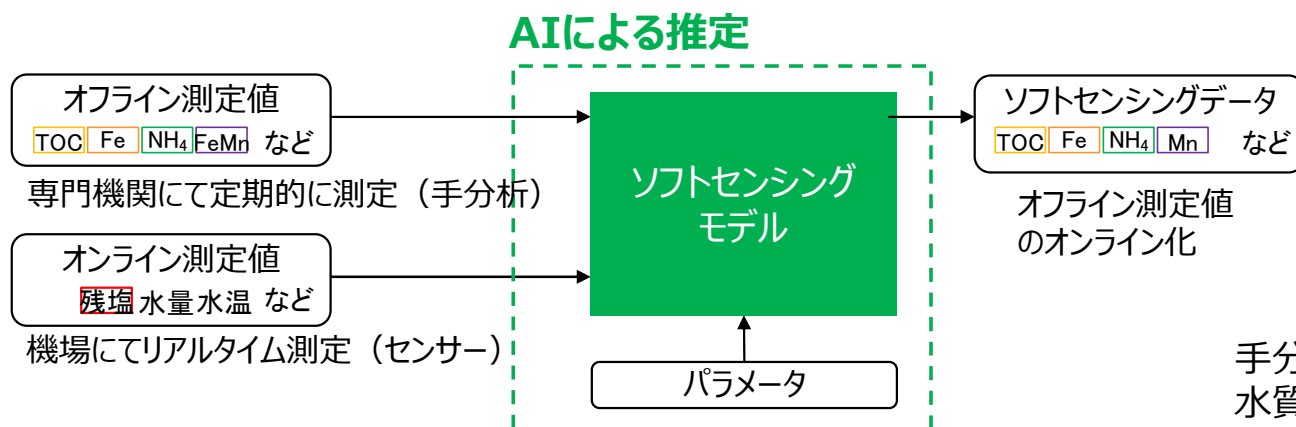
### 最適値演算モデル

沈澱池/ろ過池/浄水池の残留塩素濃度管理値を満たす、最小の前/中/後塩素注入率を求め、コスト最適化を図る。

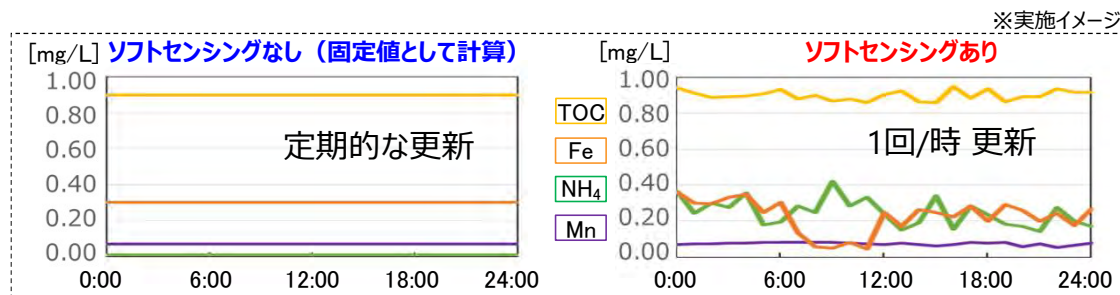
# ソフトセンシングモデル 機能概要

## ソフトセンシングモデル（ブラックボックス）

塩素消費モデルの入力となる原水水質項目の内、オンラインで取得されていないものを、他のオンライン情報から推定し、リアルタイム値として出力する。



手分析でのみ測定している水質値(TOC等)を、定期的な手分析結果およびオンライン測定値より推定する。



リアルタイム値として出力することにより、塩素消費モデルによる予測性能の向上を図る。

# ソフトセンシングモデル 実現手法

## 線形計画法を用いた手法

- 線形計画法を用いて、採水分析値を中心とする探索範囲内で最適解を探索
    - 探索範囲内で制約条件を満たす最適解を確実に導出でき、安定性が高い
    - サンプルデータ数が少なくても実行可能
- ⇒ 非定常時の推定精度、追従性に課題があり、ランダムフォレストに改良を加え追加実施

## ランダムフォレストを用いた手法

- 原水水質項目および気象項目を入力として、ランダムフォレストを用いて解を導出
  - 一般的なAI手法の中で比較的高精度なモデル構築が可能で、モデル構築後の計算が非常に高速
  - 非線形関係も分析可能で、非定常時の推定精度向上が見込める
  - 推定対象と同一時刻データを用いて学習・推定することにより追従性能向上が見込める

### 各手法の特性

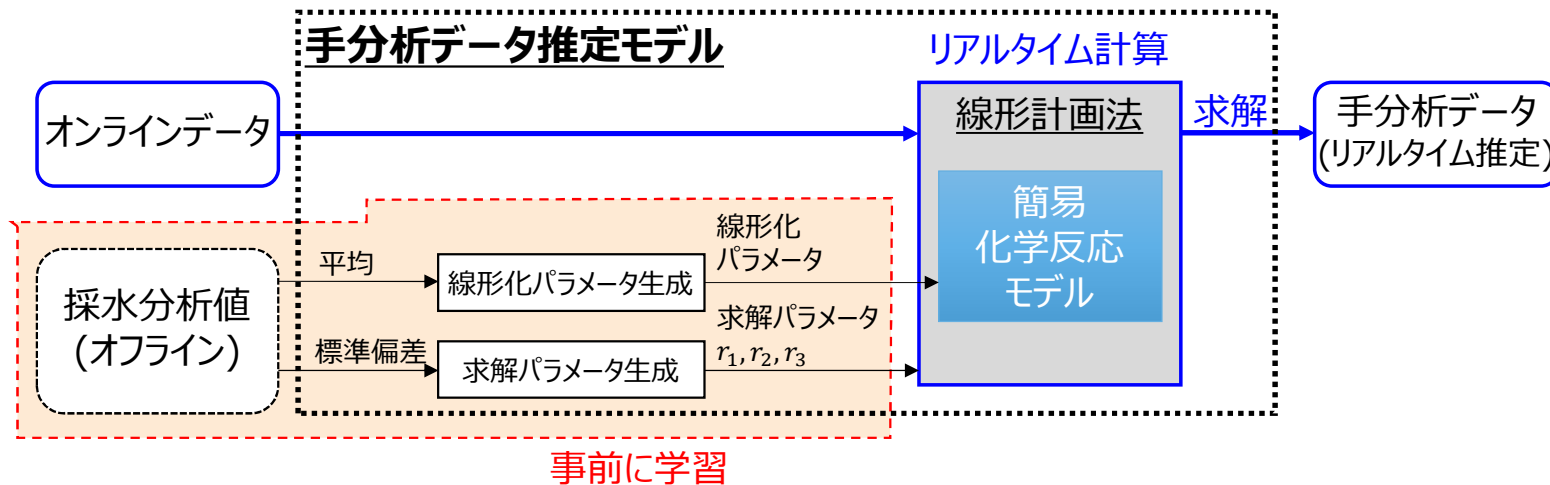
		線形計画法	ランダムフォレスト
推定精度	非定常時（ダム放流時や荒天時など）	△	○
	定常時	○	○
高速性（モデル構築後の計算が速いかどうか）		○	◎
追従性（リアルタイムに追従できるか）		△	○
安定性（出力値が安定しているか）		○	△ ⇒改良により○
学習データ数		少なくとも可	少ないと不可 ⇒改良により可



# ソフトセンシングモデル 線形計画を用いた手法

## 概要

- 採水分析値を用いて事前にパラメータを学習し、線形計画法を用いて解を導出 (メリット)
  - 探索範囲内で制約条件を満たす最適解を導出するため、解が安定
  - 採水分析サンプル数が少なくても実施可能 (デメリット)
    - 変動が大きい非定常時の推定が困難
    - 追従遅れが発生



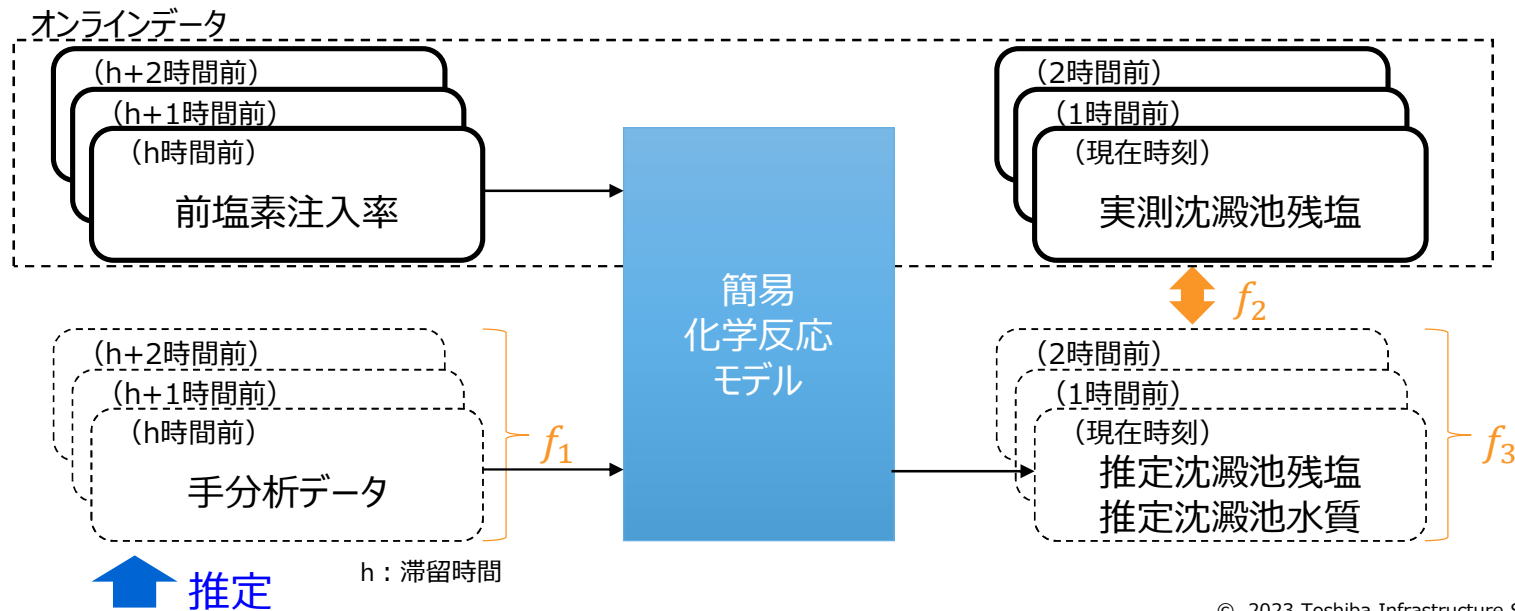
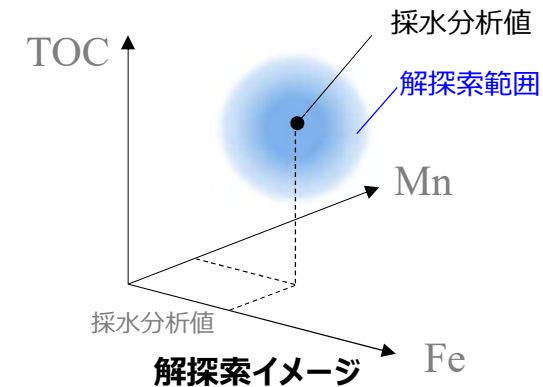
# ソフトセンシングモデル 線形計画を用いた手法

## 数理計画法

➤ 解探索範囲の中から以下の基準で最適解を導出

$$\text{Minimize: } r_1 f_1 + r_2 f_2 + r_3 f_3$$

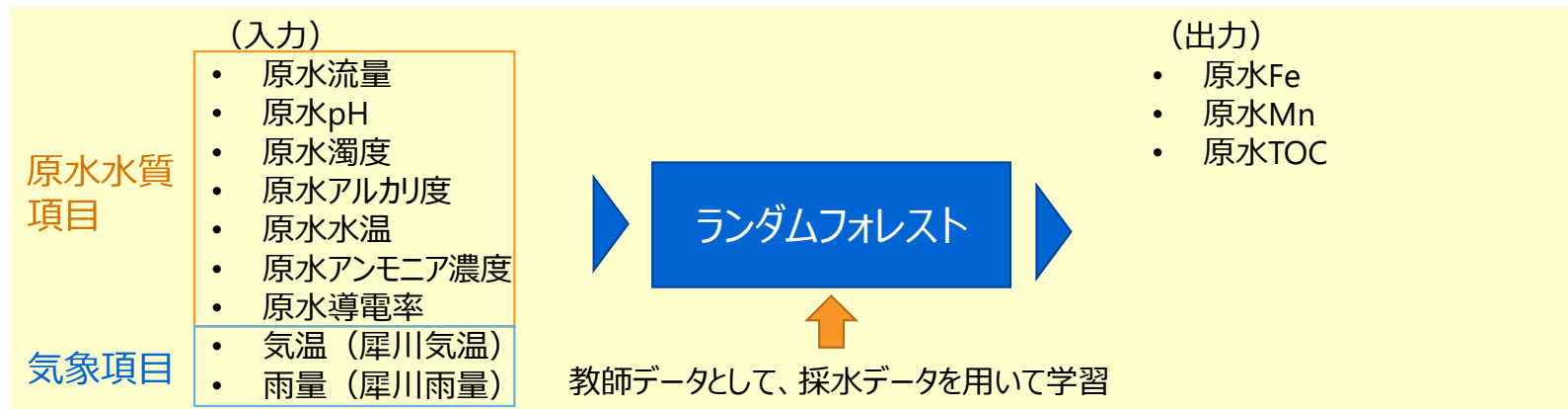
- $f_1$  : 手分析データ変動
- $f_2$  : 沈澱池残塩予測誤差
- $f_3$  : 沈澱池水質変動



# ソフトセンシングモデル ランダムフォレストを用いた手法

## 概要

- 原水水質項目および気象項目を入力として、ランダムフォレストを用いて解を導出  
(メリット)
  - 計算が非常に高速
  - 非線形関係も分析可能で、非定常時の推定精度向上が見込める
  - 推定対象と同一時刻データを用いて学習・推定することにより追従性能向上が見込める
- (デメリット)
  - 多くの学習データが必要
    - ⇒ 3次エルミート補間\*により、5分間隔の疑似データを生成し対応
  - 学習データ範囲外の推定精度が悪化するため、採水期間外の実出力値の安定性が懸念
    - ⇒ モデル切替により対応

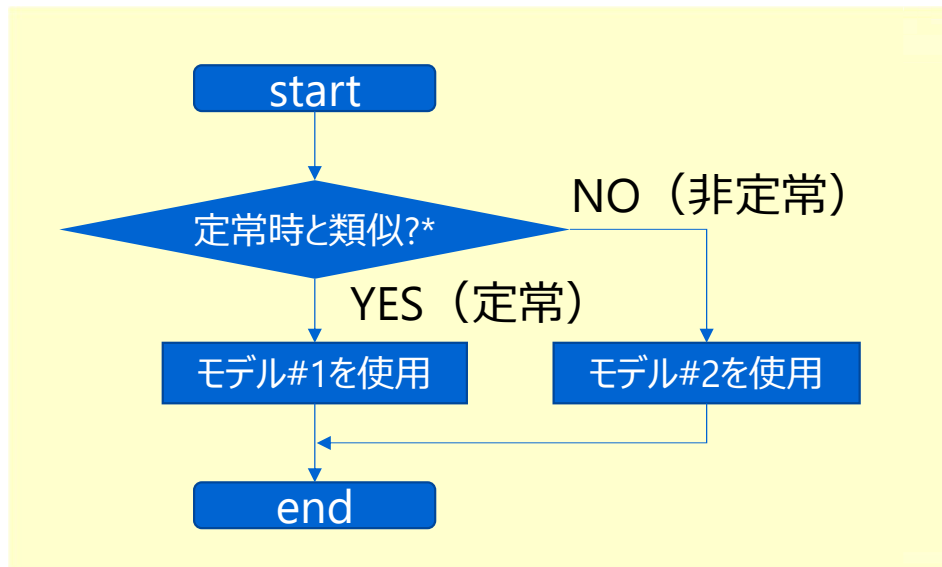


\*連続かつ振動が少ない補間手法

# ソフトセンシングモデル ランダムフォレストを用いた手法

- 実データを用いた検証により、モデル切替による安定性向上を確認  
ランダムフォレスト入力9項目について、
  - 定常時の採水分析データと類似<sup>\*1</sup> ⇒ モデル#1を使用
  - 非定常時の採水分析データと類似<sup>\*1</sup> ⇒ モデル#2を使用

<sup>\*1</sup> k近傍法(k=1)を使用



	使用学習データ
モデル#1	定常時の採水分析データ
モデル#2	すべて <sup>*2</sup> の採水分析データ

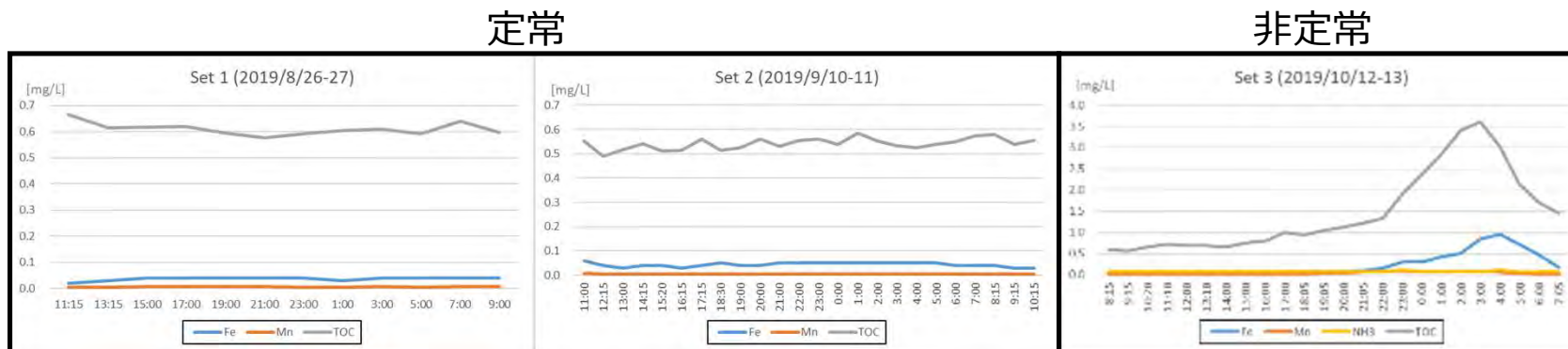
<sup>\*2</sup> 事前のデータ検証により、非定常時のみを学習データとした場合と比較し、推定精度の向上がみられたため

# ソフトセンシングモデル 性能評価

- 原水水質推定
  - 原水Fe, Mn, TOCの通年のソフトセンシング結果を評価
  - 演算結果が取り得る範囲内で出力され、異常値がないか検証
- ろ過水残留塩素濃度予測
  - 各ソフトセンシング結果を用いた際のろ過水残留塩素濃度予測に対する影響を評価
  - 実績値と比較し、ソフトセンシングによる誤差改善効果を検証

## シミュレーション実施条件

- 2020/4/1～2021/3/31、2021/4/1～2022/3/31の2年間分実施
- 下記の採水分析データを用いて実施

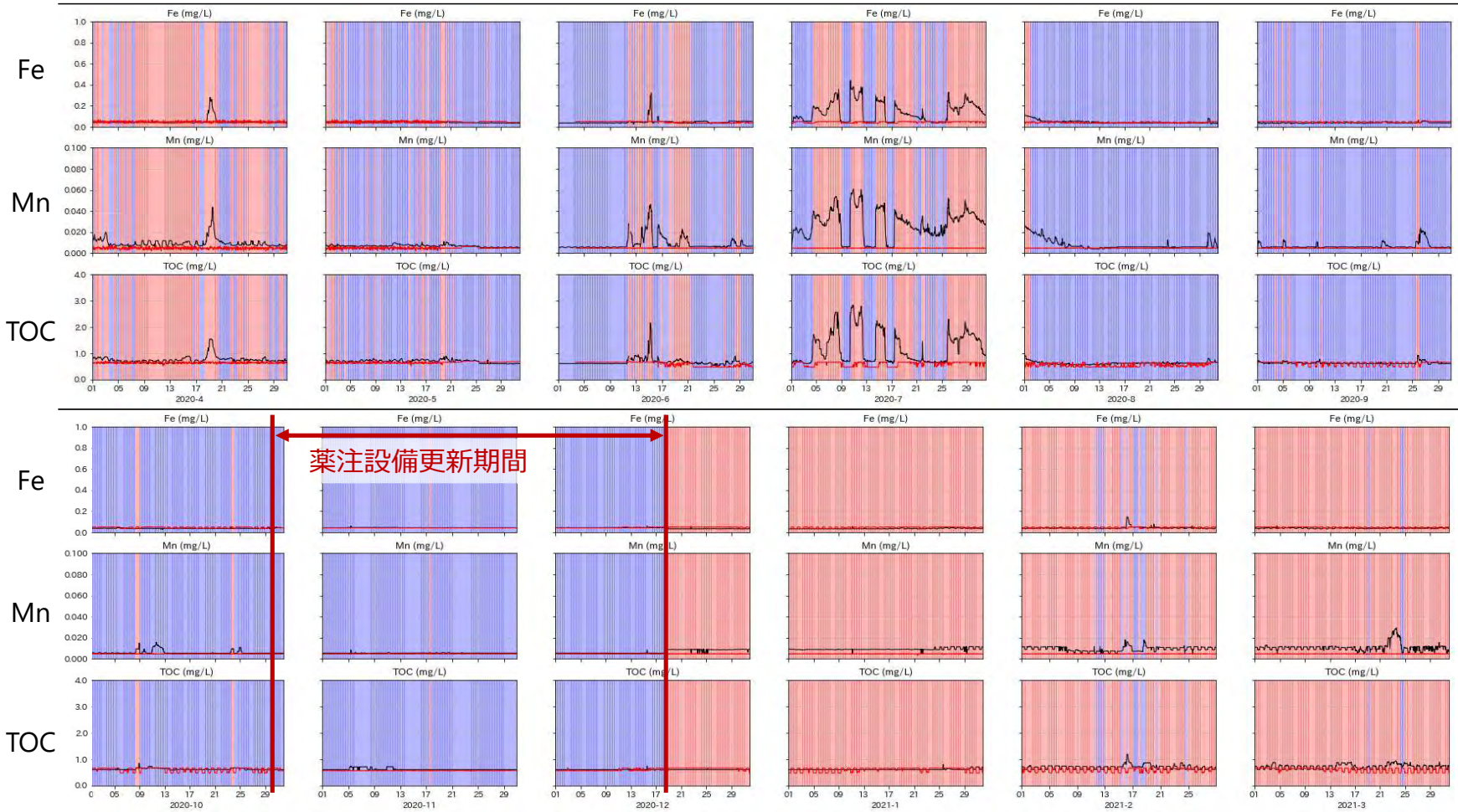


Set	採水期間	採水回数	状態
Set 1	2019/8/26 11:15 ~ 2019/8/27 9:00	2時間おき12回採水	定常
Set 2	2019/9/10 11:00 ~ 2019/9/11 10:15	1時間おき24回採水	定常
Set 3	2019/10/12 8:15 ~ 2019/10/13 7:05	1時間おき24回採水	非定常



# ソフトセンシングモデル 原水水質推定結果の比較

線形計画とランダムフォレストのソフトセンシング結果比較 (2020/4~2021/3)



— 線形計画  
— ランダムフォレスト (切替あり)  
( 定常 非常 )

各水質項目の取り得る範囲をグラフの縦軸上限に設定

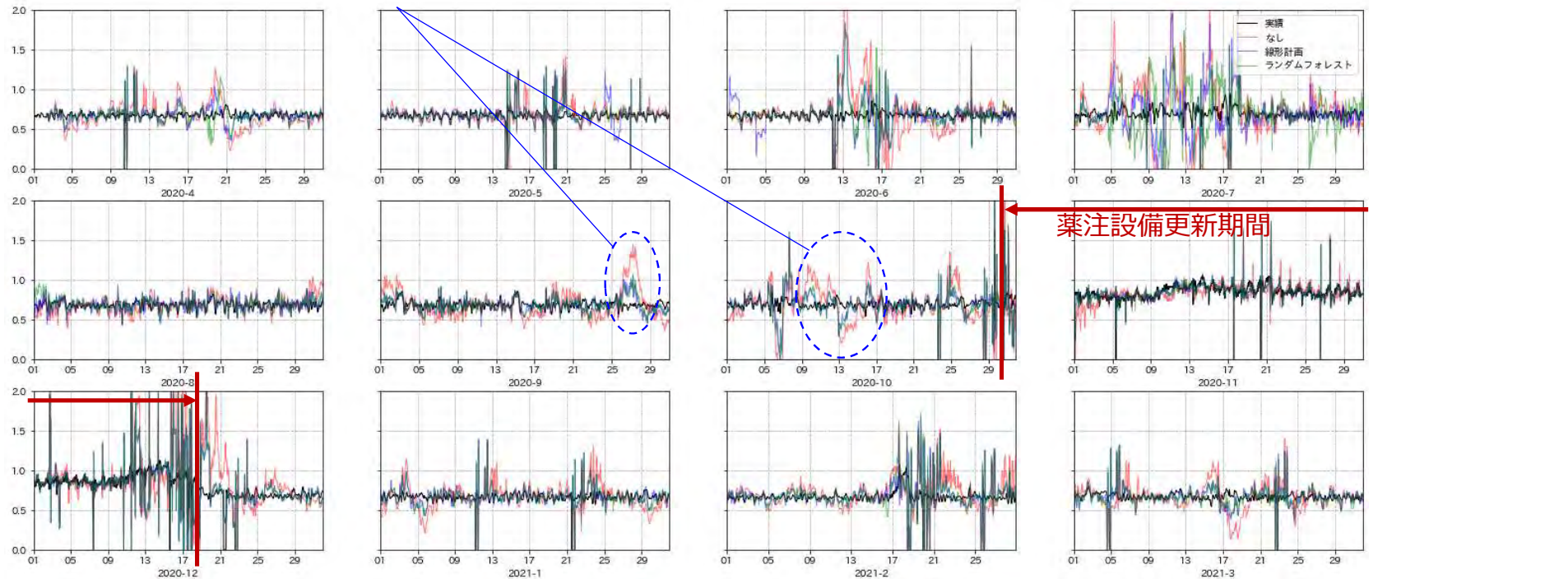
	取り得る範囲
Fe	0 ~ 1.0 mg/L
Mn	0 ~ 0.1 mg/L
TOC	0 ~ 4.0 mg/L

非定常時も、取り得る範囲内での出力結果が得られた。

# ソフトセンシングモデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測トレンド（通年）

ソフトセンシングにより誤差が低減

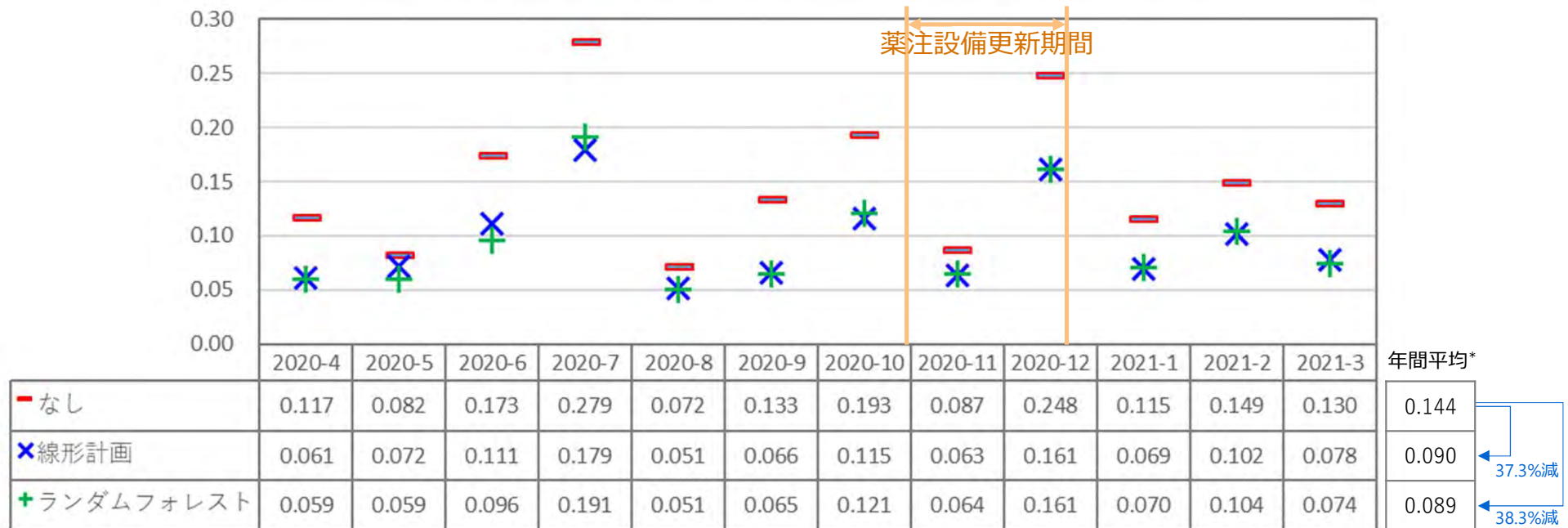


- ソフトセンシングなしと比較し、ソフトセンシングありはいずれも誤差が低減
- 7月の荒天時は原水水質推定が困難のため予測精度が悪化
- 10～12月の薬注設備更新期間は伏流水メインの運転となり、機特性が異なるため予測精度が悪化

# ソフトセンシングモデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測の絶対誤差（通年）

ろ過水残塩濃度予測の平均絶対誤差(mg/L)



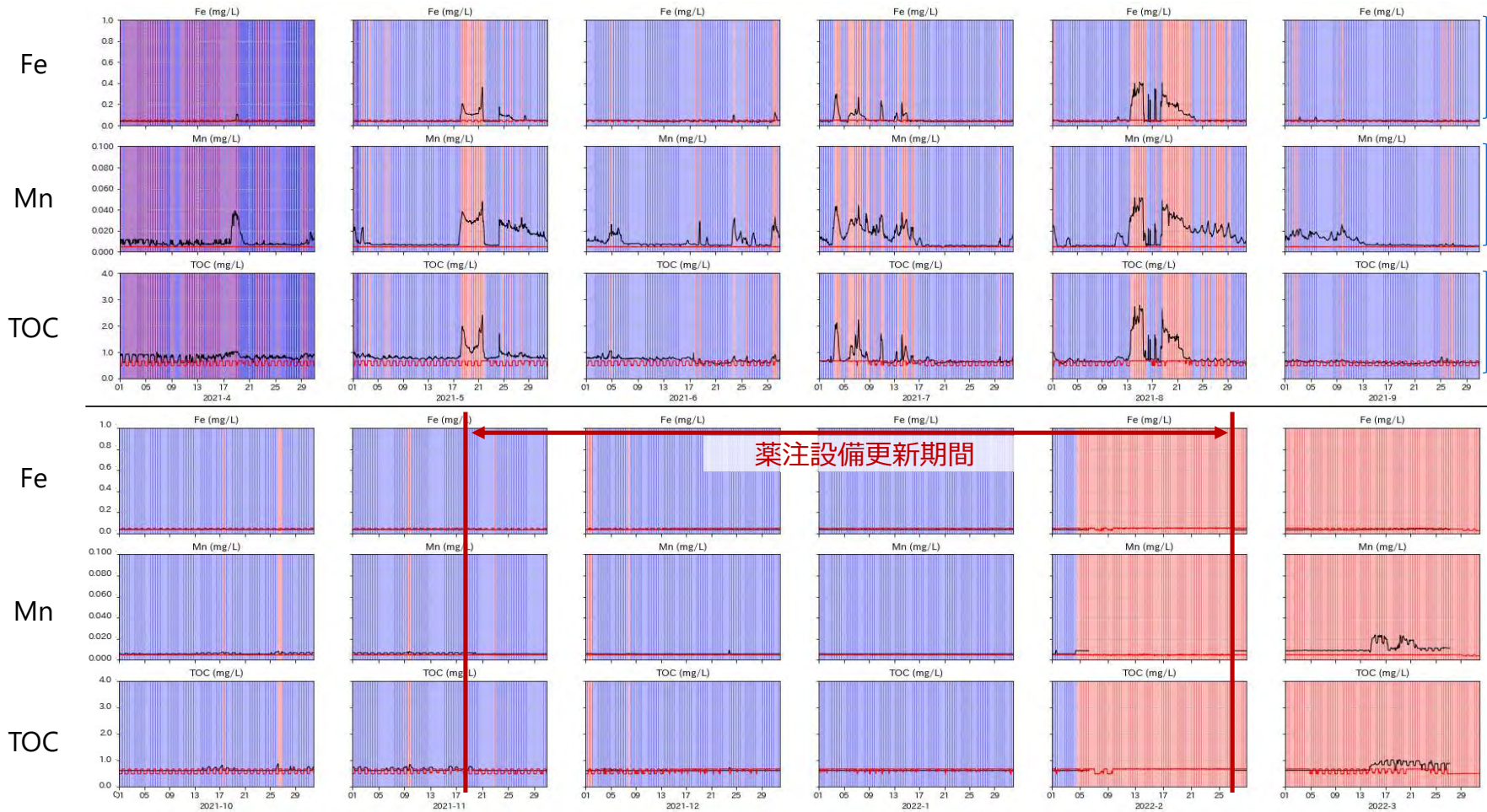
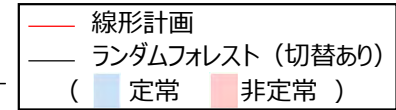
- ソフトセンシングにより、線形計画、ランダムフォレストそれぞれ年間平均37.3%、38.3%のろ過水残塩濃度予測の精度改善が見られた\*
- 7月の荒天時は、原水水質が学習データ範囲外であったため誤差が拡大したと考えられる
- 10～12月の薬注設備更新期間は、機場特性が異なるため誤差が拡大したと考えられる

\* 薬注設備更新期間を除く



# ソフトセンシングモデル 原水水質推定結果の比較

線形計画とランダムフォレストのソフトセンシング結果比較 (2021/4~2022/3)



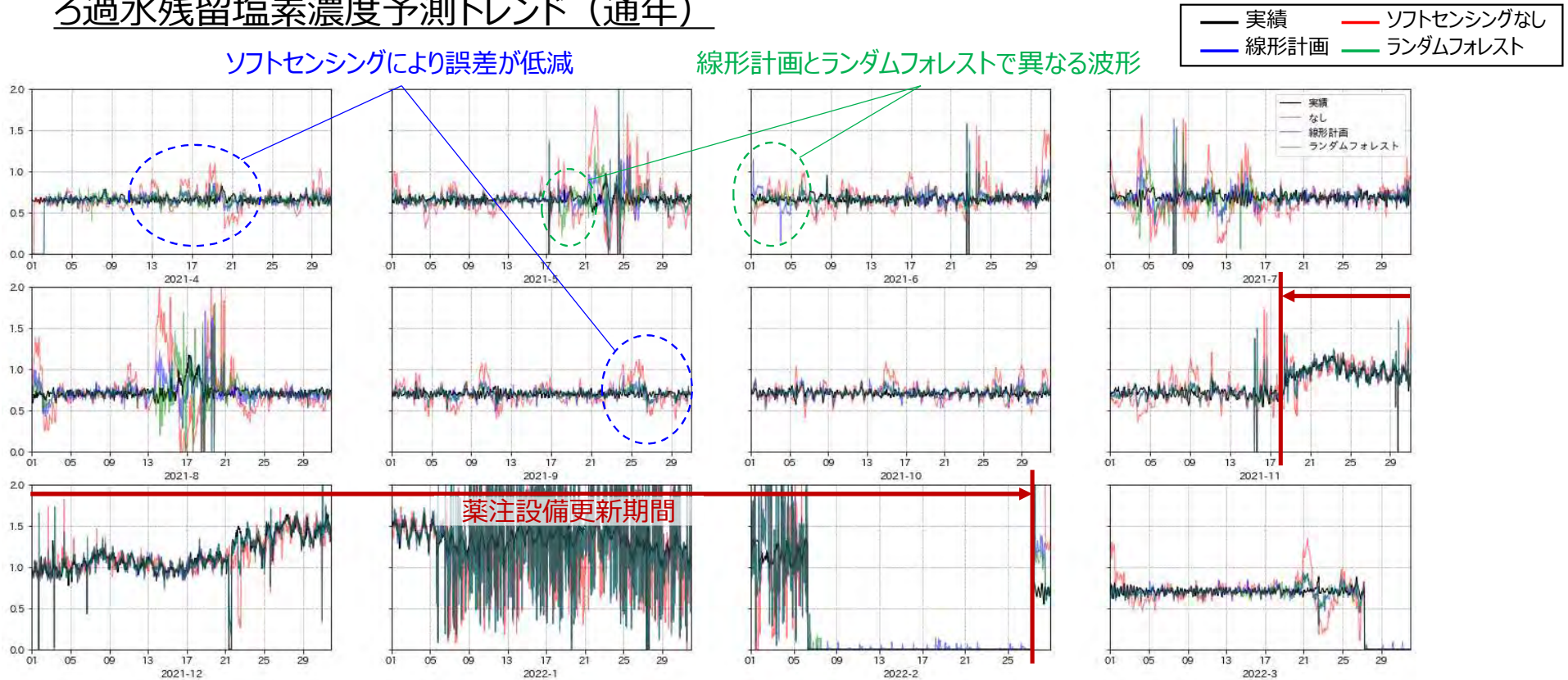
各水質項目の取り得る範囲をグラフの縦軸上限に設定

	取り得る範囲
Fe	0 ~ 1.0 mg/L
Mn	0 ~ 0.1 mg/L
TOC	0 ~ 4.0 mg/L

非定常時も、取り得る範囲内での出力結果が得られた。

# ソフトセンシングモデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測トレンド（通年）



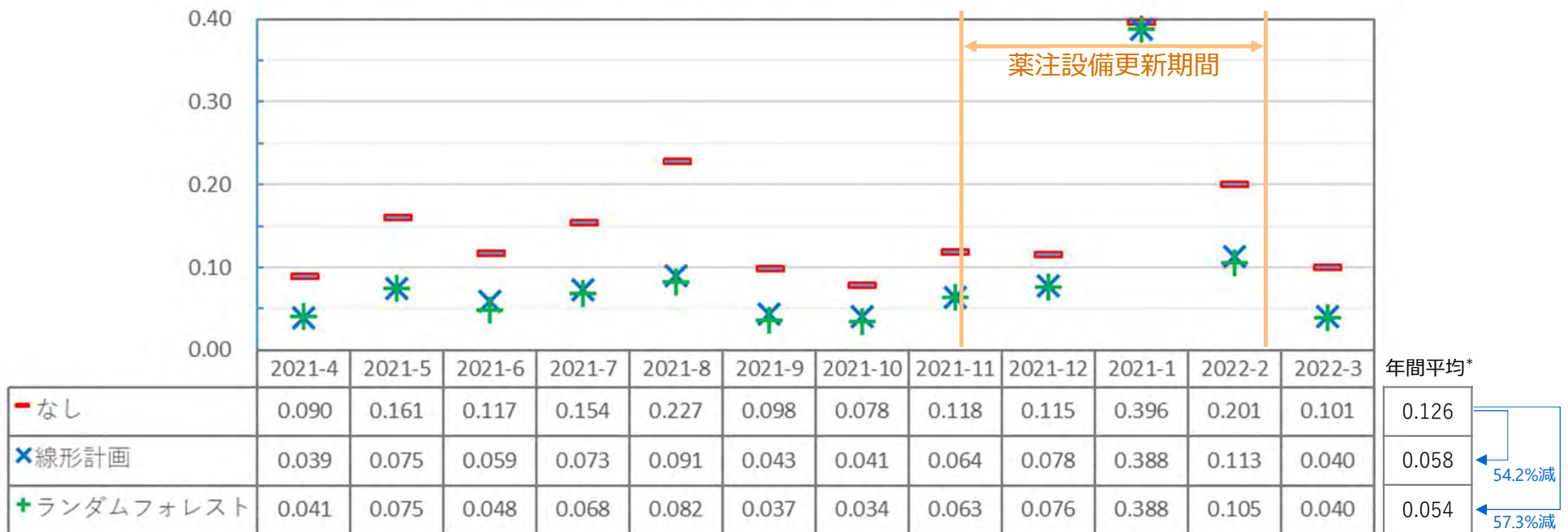
- ソフトセンシングなしと比較し、ソフトセンシングありはいずれも誤差が低減
- 8月の荒天時は原水水質推定が困難のため予測精度が悪化
- 11～2月の薬注設備更新期間は伏流水メインの運転となり、機場特性が異なるため予測精度が悪化



# ソフトセンシングモデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測の絶対誤差（通年）

ろ過水残塩濃度予測の平均絶対誤差(mg/L)

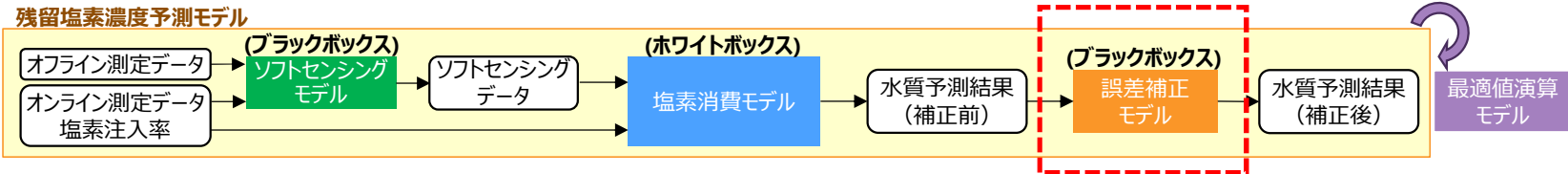


- ソフトセンシングにより、線形計画、ランダムフォレストそれぞれ年間平均54.2%、57.3%のろ過水残塩濃度予測の精度改善が見られた\*
- 8月の荒天時は、原水水質が学習データ範囲外であったため誤差が拡大したと考えられる
- 11～2月の薬注設備更新期間は、機場特性が異なるため誤差が拡大したと考えられる

\* 薬注設備更新期間を除く

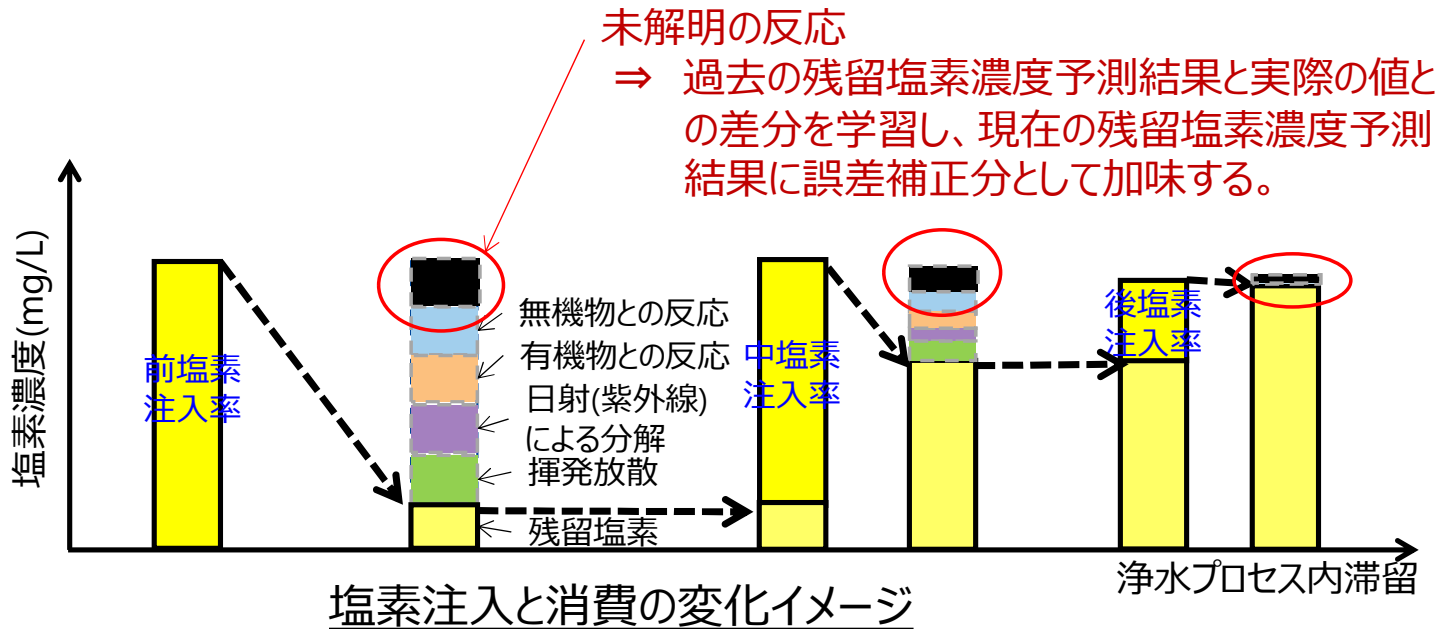


# 誤差補正モデル 機能概要



## 誤差補正モデル (ブラックボックス)

塩素消費モデル上で実装されていない未知の影響や機場特性を、過去実績との予測誤差に基づき補正する。



# 誤差補正モデル 実現手法

## 補正手法1

- 自己回帰モデルにより誤差を補正
- 前日以前の同時刻に注入した塩素について、残留塩素濃度の予測と実測の誤差を集計

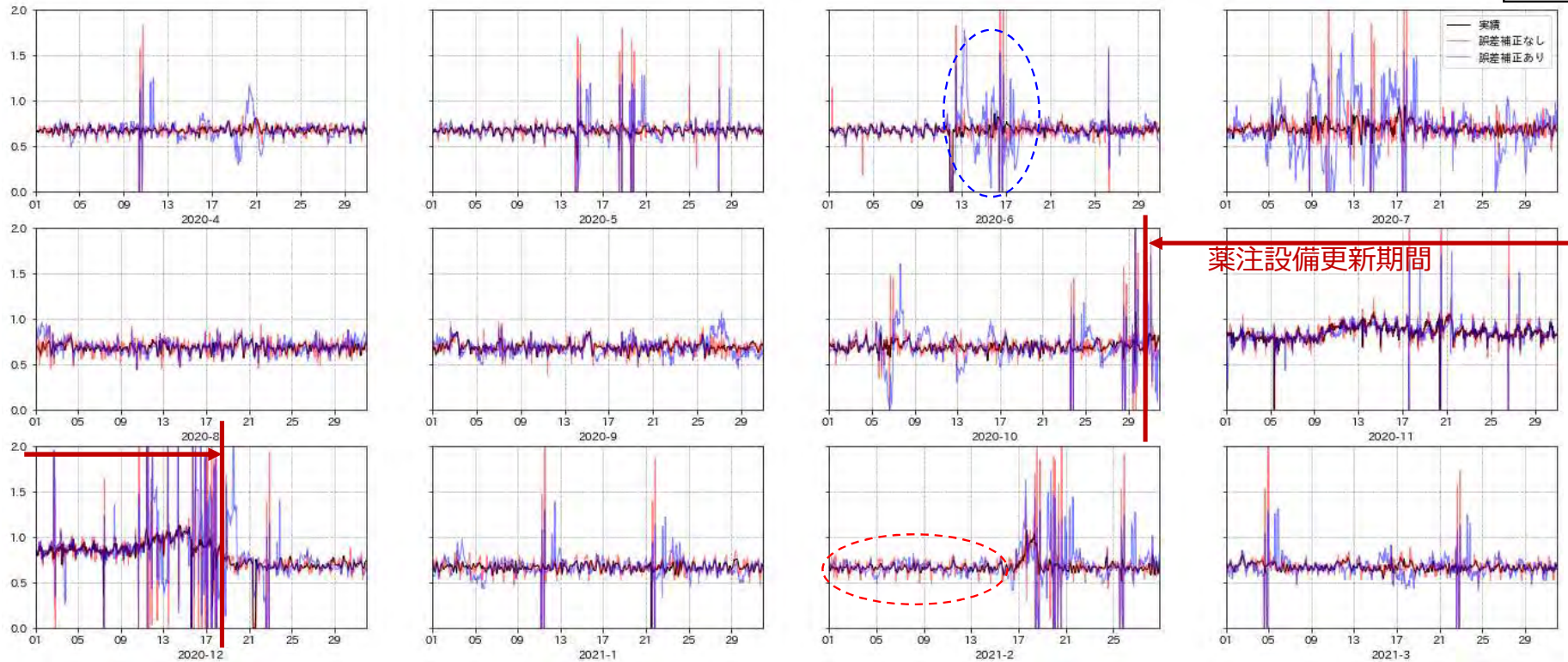
## 誤差補正モデル有無によるろ過水残留塩素濃度予測性能への影響検証

- ろ過水残留塩素濃度予測精度の補正前と補正後を比較評価し、誤差補正モデルによる予測精度改善効果を検証
  - 実施期間：2020/4/1～2021/3/31
  - 使用ソフトセンシングモデル：ランダムフォレスト

# 誤差補正モデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測トレンド (2020/4~2021/3)

— 実績  
 — 誤差補正なし  
 — 誤差補正あり

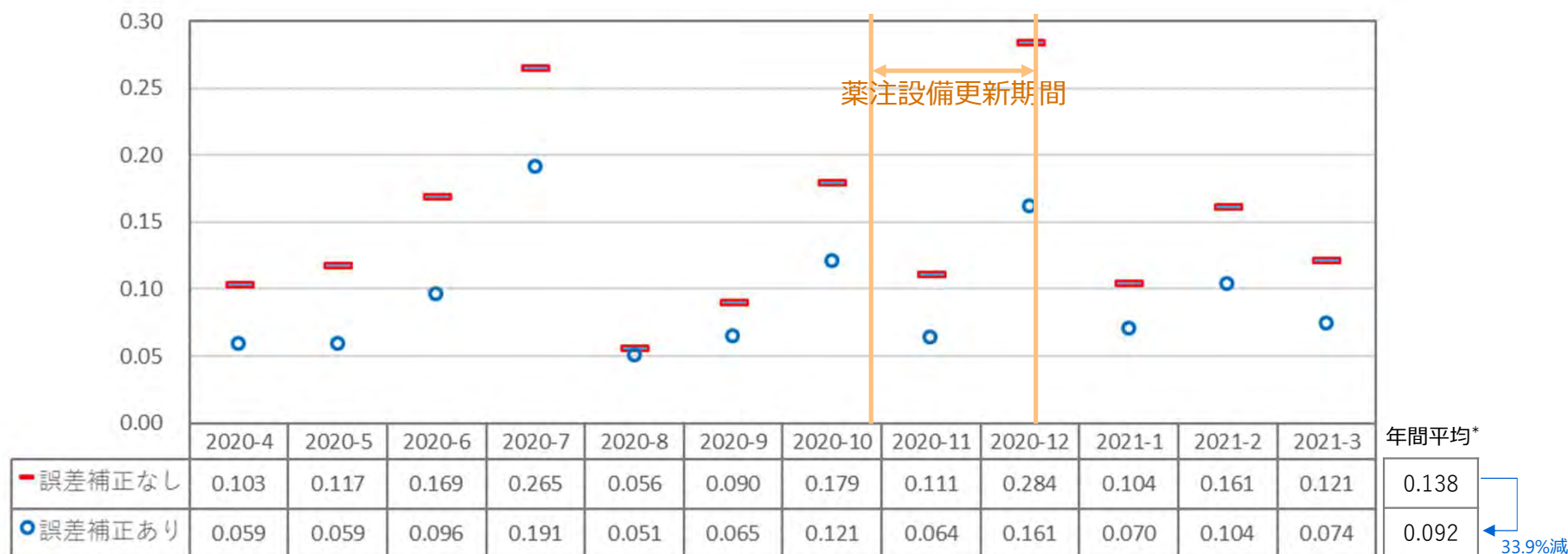


- 『誤差補正なし』に存在する周期的な小さな誤差が、『誤差補正あり』では低減 (例 :  )
- 『誤差補正なし』に存在しなかった突発的な大きな誤差が、『誤差補正あり』で発生 (例 :  )

# 誤差補正モデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測の絶対誤差 (2020/4~2021/3)

ろ過水残留塩素濃度予測の平均絶対誤差(mg/L)



- 誤差補正により、年間平均33.9%のろ過水残留塩素濃度予測の精度改善が見られた\*

\* 薬注設備更新期間を除く

## 誤差補正モデル 改良手法

補正手法1における課題： 前日以前の注入についての誤差を集計するため、  
急激な水質変動に対応できず性能が悪化する可能性  
⇒ 最も近い誤差集計可能な時刻の注入についての誤差を考慮できるよう修正

### **補正手法2**

- 自己回帰モデルにより誤差を補正
- 前日以前の同時刻に注入した塩素について、残留塩素濃度の予測と実測の誤差を集計
- 上記に、現在時刻より滞留時間前に注入した塩素についての予測と実測の誤差を考慮

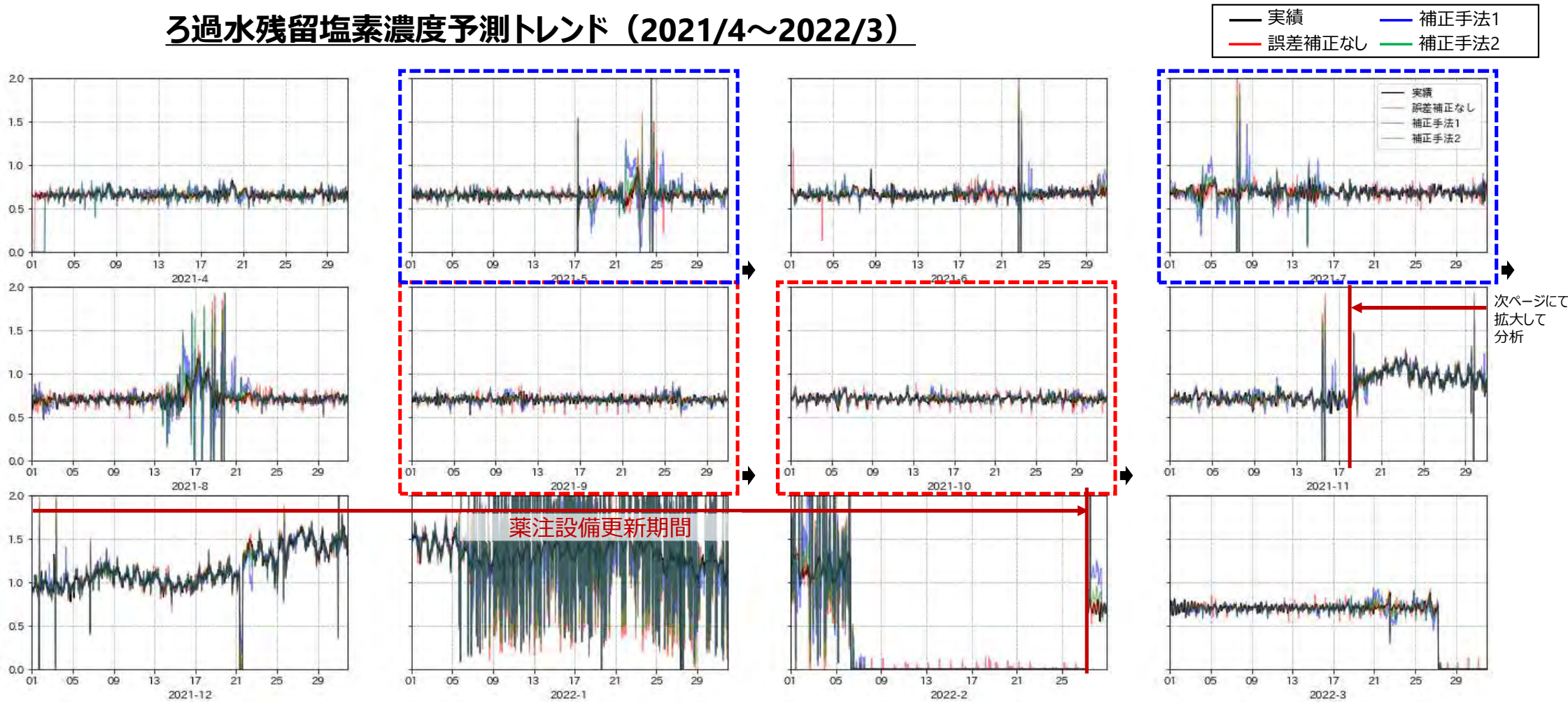
### **誤差補正モデル有無によるろ過水残留塩素濃度予測性能への影響検証**

- ろ過水残留塩素濃度予測精度の補正前と補正後を比較評価し、  
誤差補正モデルによる予測精度改善効果を検証
  - 実施期間：2021/4/1～2022/3/31
  - 使用ソフトセンシングモデル：ランダムフォレスト



# 誤差補正モデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測トレンド (2021/4~2022/3)



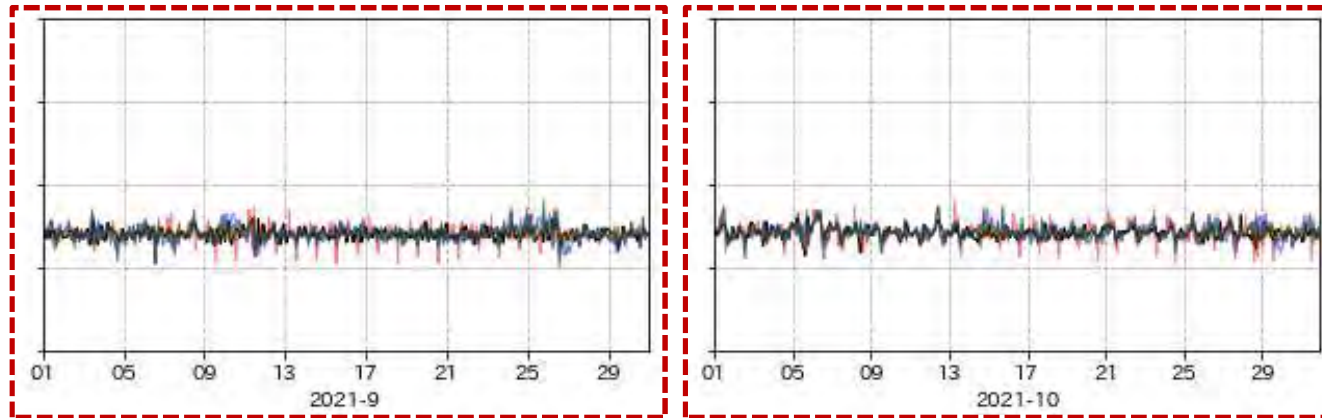
- 8月の荒天時および11~2月の薬注設備更新期間は予測精度が悪化



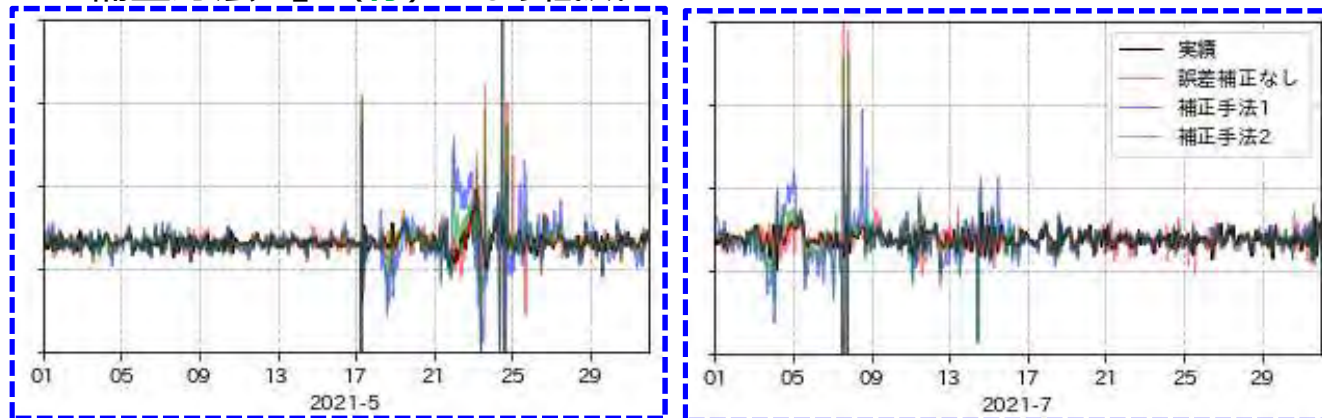
# 誤差補正モデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測トレンド (2021/4~2022/3)

- 『誤差補正なし』 (赤) に存在する周期的な小さな誤差が、『補正手法1・2』 (青・緑) では低減



- 『誤差補正なし』に存在しなかった突発的な大きな誤差が、『補正手法1』 (青) で発生したが、『補正方法2』 (緑) により低減



# 誤差補正モデル ろ過水残留塩素濃度予測結果の比較

## ろ過水残留塩素濃度予測の絶対誤差 (2021/4~2022/3)

ろ過水残塩濃度予測の平均絶対誤差(mg/L)



- 誤差補正により、補正手法1, 2それぞれ年間平均35.7%, 46.2%のろ過水残留塩素濃度予測の精度改善が見られた\*
- 8月の荒天時も、誤差補正により予測精度が向上した
- 全期間を通じて、補正手法1より補正手法2の精度改善効果が高く、補正手法2が有効と考えられる
- ろ過水の残留塩素濃度を平均絶対誤差約0.045mg/Lの精度で予測できることを確認した。

## 本章まとめ

研究目標		実施項目と成果
確認項目 ②	AIによるソフトセンシングモデルの検証 (オフライン検証)	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と手分析結果を比較し、最適なモデル構築およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
成果	ソフトセンシングモデル	<ul style="list-style-type: none"><li>• 原水水質推定において、非定常時も取り得る範囲内での出力結果が得られた。</li><li>• ろ過水残留塩素予測において、ソフトセンシングなしと比較し、線形計画法とランダムフォレストいずれの手法も予測精度が改善。</li><li>• アプリ上ではいずれかの手法を実装。評価結果より精度面においては両者は同等。</li><li>• 安定性の面では線形計画法、計算速度の面ではランダムフォレストが有効で、採水データ数やサーバスペックなど導入先機場の状況に合わせて使い分けが可能。</li><li>• 誤差補正モデルにより残留塩素濃度予測精度の向上が可能。</li></ul>
	誤差補正モデル	<ul style="list-style-type: none"><li>• 誤差補正により、誤差補正なしの場合と比較して最大で年間平均46.2%のろ過水残塩濃度予測の精度改善を確認。</li><li>• 荒天時や薬注設備更新期間など、誤差補正による予測精度が向上した。</li><li>• 補正手法1より補正手法2の方が精度向上し、補正手法2が有効と考えられた。</li></ul>

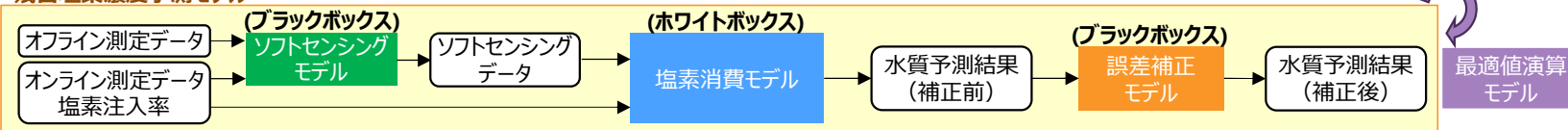
# 06

確認項目③

塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価  
(現地実証試験)

# 研究目標および確認項目

残留塩素濃度予測モデル

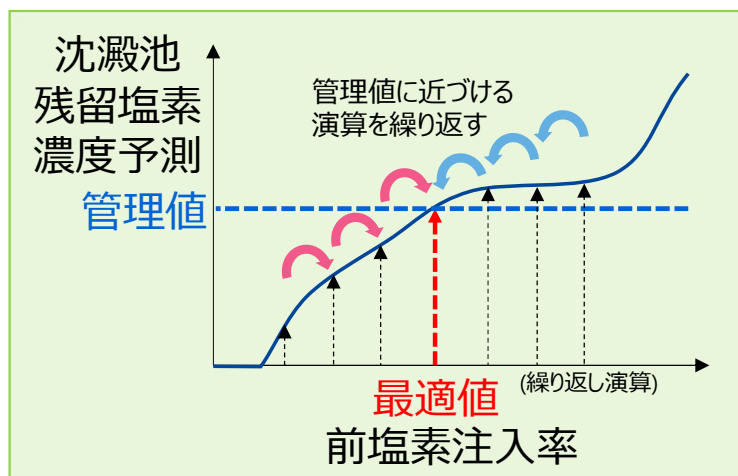


研究目標		水質計器による計測値、日射・紫外線量およびAIによるソフトセンシングを用いた塩素消費ハイブリッドモデルによる塩素消費量予測技術の構築と、塩素消費量予測に基づく塩素注入最適値演算手法の確立。
確認項目 ①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証 (オフライン検証)	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費量演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
確認項目 ②	AIによるソフトセンシングモデルの検証 (オフライン検証)	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と採水分析結果を比較し、最適なモデル構成およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
確認項目 ③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価 (現地実証試験)	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動による影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。

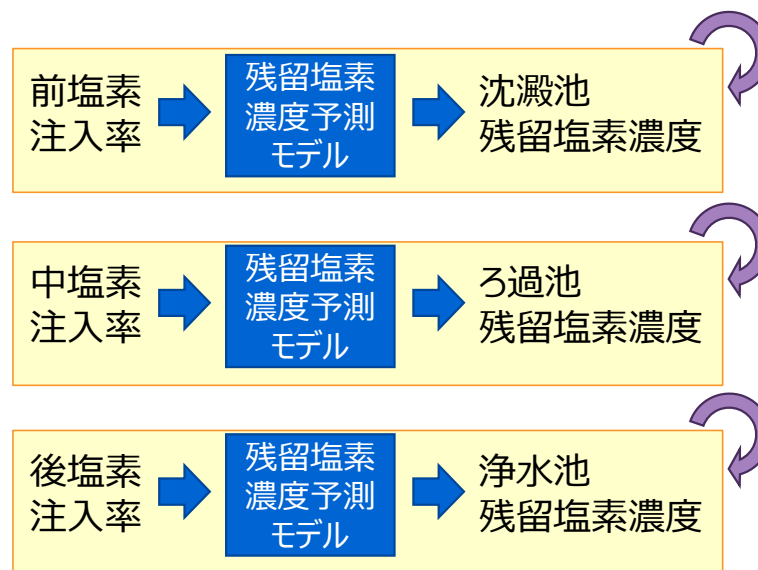
# 最適値演算モデル概要

## 最適値演算モデル

沈澱池/ろ過池/浄水池の残留塩素濃度管理値を満たす、最小の前/中/後塩素注入率を求め、コスト最適化を図る。



残留塩素濃度予測モデルによる演算結果



※ 犀川浄水場では非対象

繰り返し演算し、  
管理値を満たす最小の塩素注入率を求める



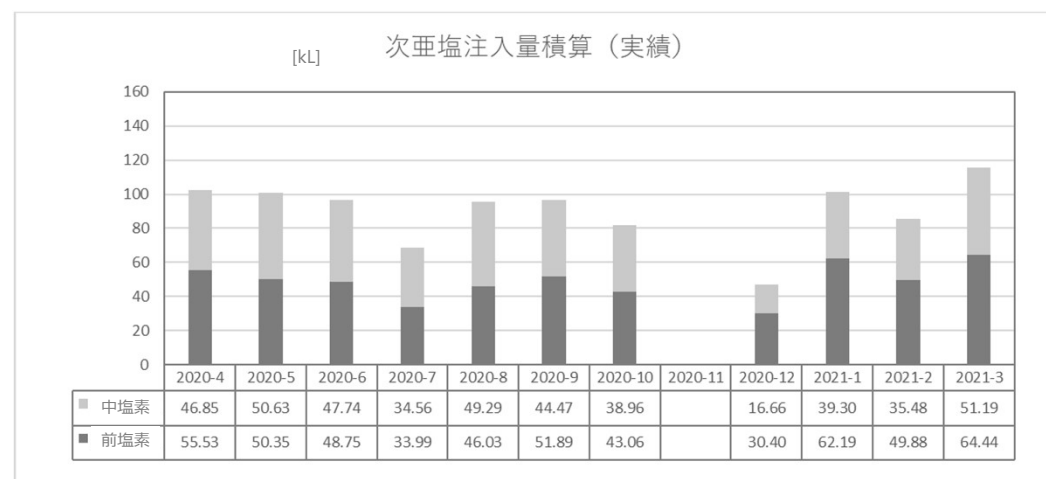
# 薬品注入コスト削減効果の検証

- 下記の管理値における、前・中塩素注入の最適値演算を実施

	沈澱水残塩濃度	ろ過水残塩濃度	浄水残塩濃度
最適化パターンA管理値	0.05 mg/L	0.50 mg/L	0.50 mg/L
最適化パターンB管理値	0.02 mg/L	0.50 mg/L	0.50 mg/L
(参考) 実績平均値	0.09mg/L	0.68mg/L	0.57mg/L

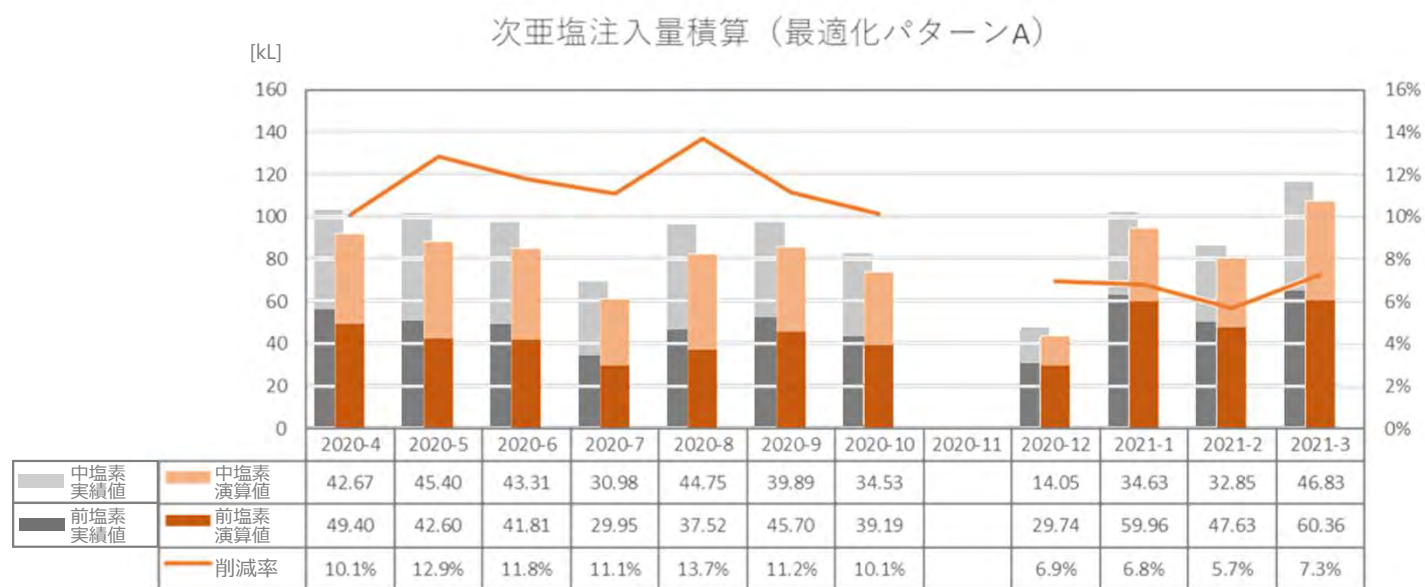
- 年間を通じた削減効果を試算

- 期間：2020/4/1~2021/3/31  
(ただし、2020/10/30~2020/12/18は薬品注入設備更新期間のため除外)
- 各日、0:00に作成した最適値による運転計画を24時間運用したと仮定



# 薬品注入コスト削減効果の検証

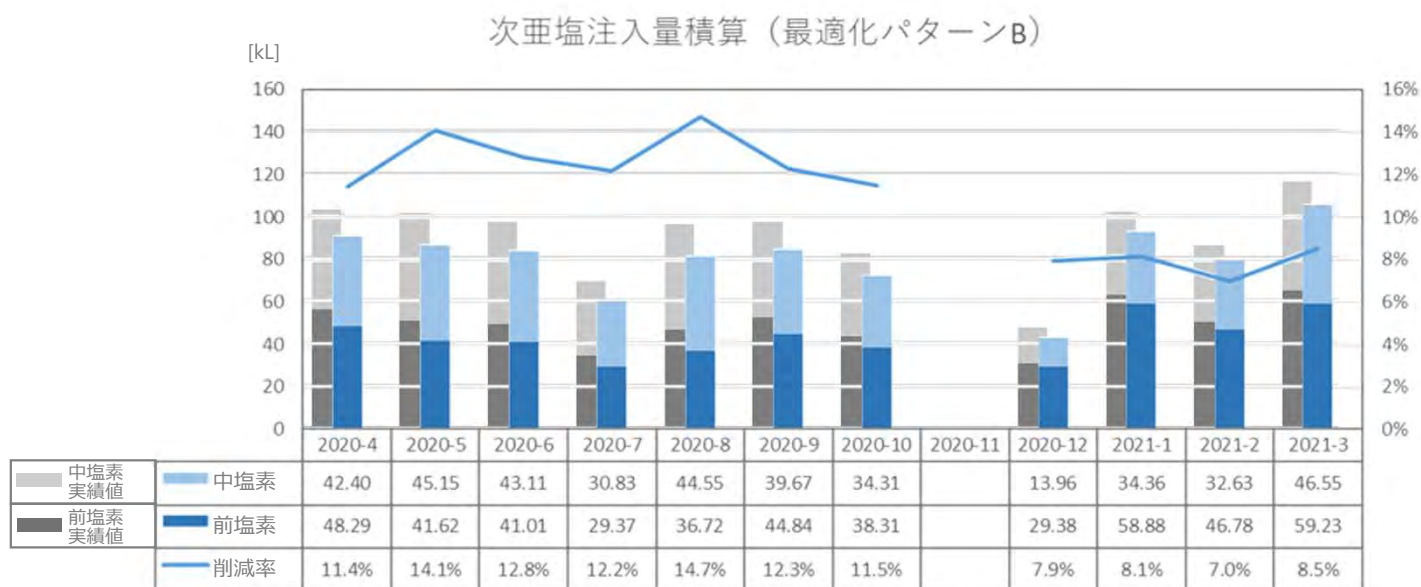
- 年間塩素注入量（最適化パターンA）
  - 試算結果



- 年間を通じて9.8%の削減効果がみられた。
- ろ過水残留塩素濃度の推定精度が最も高かった2020/8に高い削減効果を示した。

# 薬品注入コスト削減効果の検証

- 年間塩素注入量（最適化パターンB）
  - 試算結果



- 年間を通じて11.0%の削減効果がみられた。
- パターンBの方が沈澱池残塩濃度の管理値が低く、前塩素注入率を下げる事が可能なため、紫外線分解に相当する塩素注入量を削減可能であると考えられる。

# 塩素最適注入率演算値の実機場検証

## 目的

アプリケーションの動作検証と従来運転との薬品注入率の比較検証を実施

## 実施方法

前塩素\*の注入率最適値を塩素注入アプリケーションにて演算し、その演算された前塩素注入率をオペレータに伝え、1時間おきに注入率を手動で変更して浄水場で検証を実施

2022/11/16 8:00～17:00の試験期間内において、浄水場の運転管理基準となる0.01mg/L以上を最低限維持しつつ、制御目標値として設定した0.10mg/Lへの追従性を検証

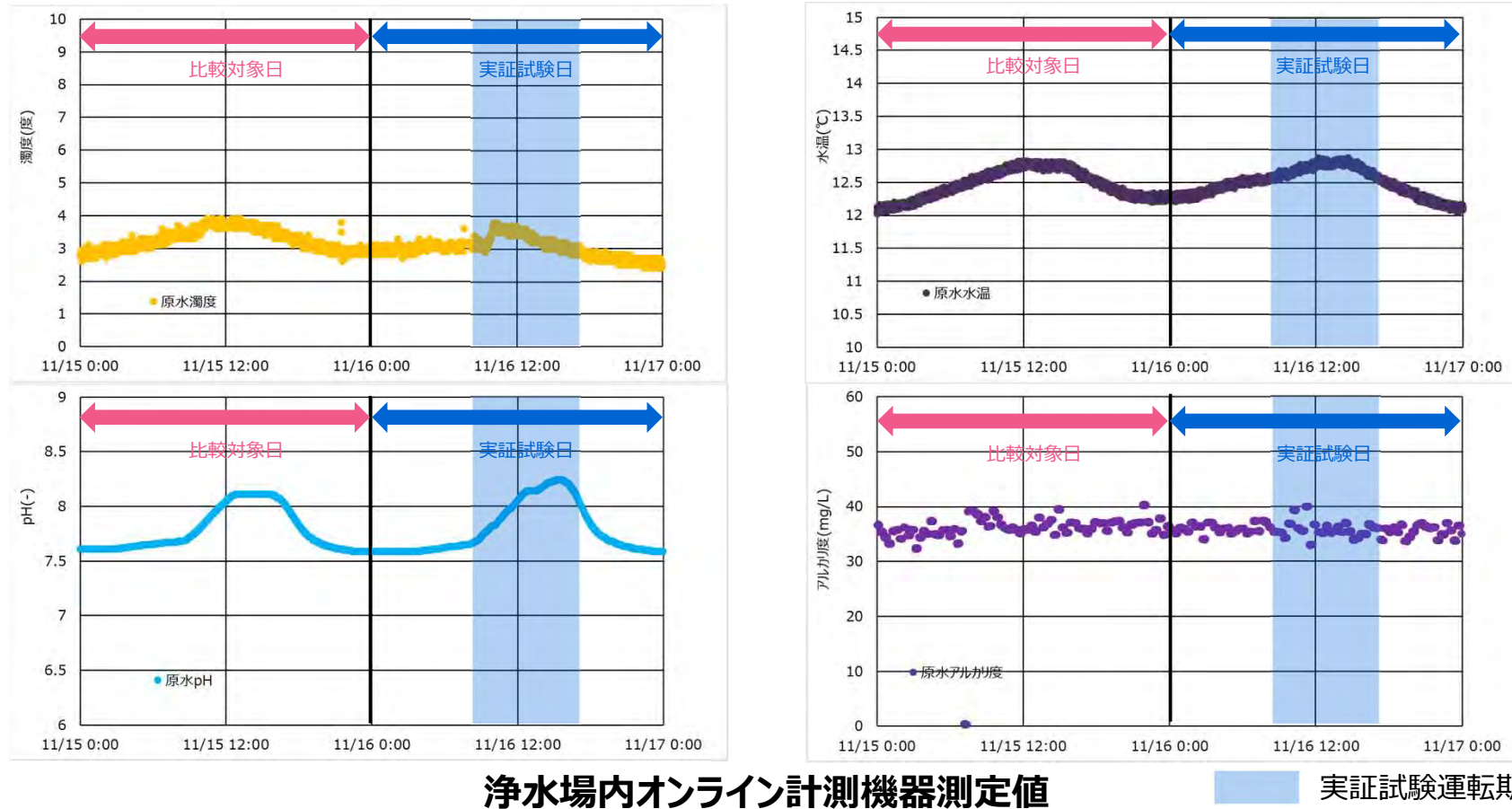
## 評価方法

- 1) 前日との条件比較： 前日と原水水質等の条件を確認し、比較対象として前日との比較が適切であるかを分析
- 2) 運転結果検証： 制御目標値への追従性や時刻毎のアプリケーション動作の検証
- 3) シミュレーション検証： 将来的な自動運転を想定し、1分単位でのシミュレーションも併せて実施  
1分単位で動作させた場合との前塩素注入率および沈澱池残塩の変化を比較し検証
- 4) 塩素消費要因に関する考察： 原水水質分析結果とソフトセンシング値の比較、および塩素消費要因の分析を実施

\* 実証機場では前塩素と中塩素注入のみで運用されており、後塩素注入が無い場合、配水できない塩素不足の水を生産するリスクを回避するため、実証試験は前塩素のみを検証対象とした。

## 実機場検証 1) 前日との比較 原水水質①

- 浄水場に設置されているオンライン計測機器による水質の測定結果では、比較対象日（前日）と実証試験日とで、原水水質の違いはほとんど見られなかった。



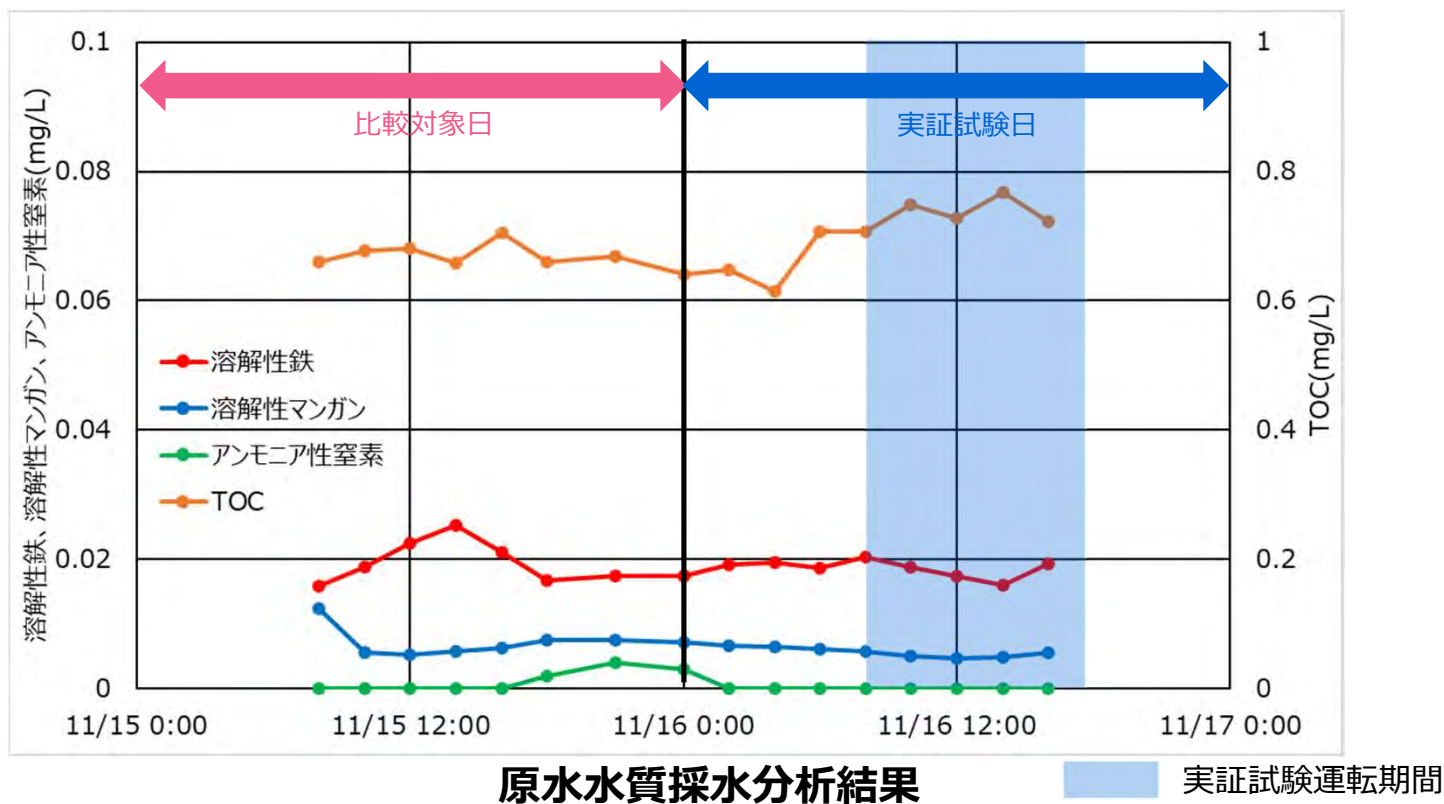
浄水場内オンライン計測機器測定値

実証試験運転期間

## 実機場検証 1) 前日との比較 原水水質②

- 採水分析結果から、代表的な塩素消費物質の鉄、マンガン、アンモニア性窒素\*)、TOCについても、比較対象日と実証試験日とに顕著な水質の違いは見られなかった。

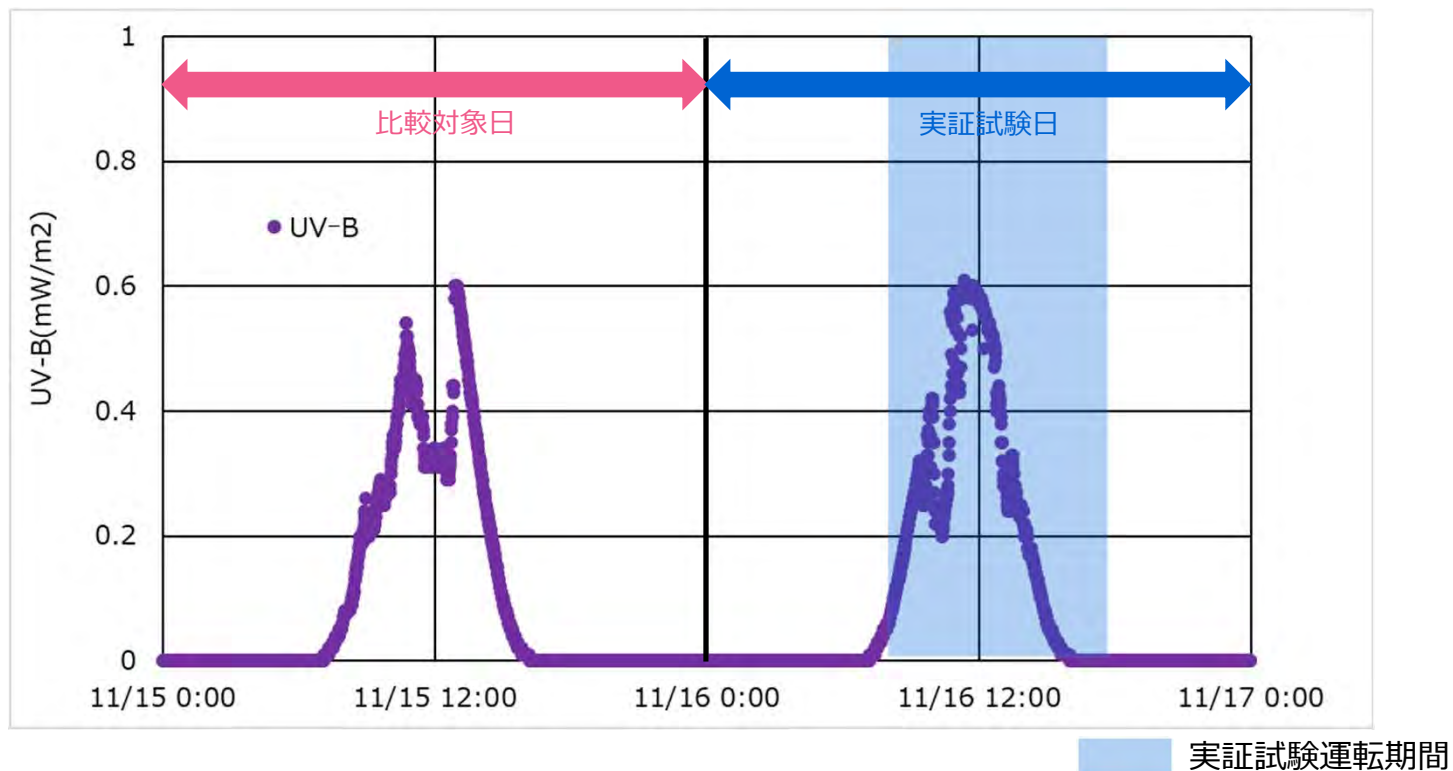
\*)アンモニア性窒素分析の検出下限0.08mg/L





## 実機場検証 1) 前日との比較 紫外線量

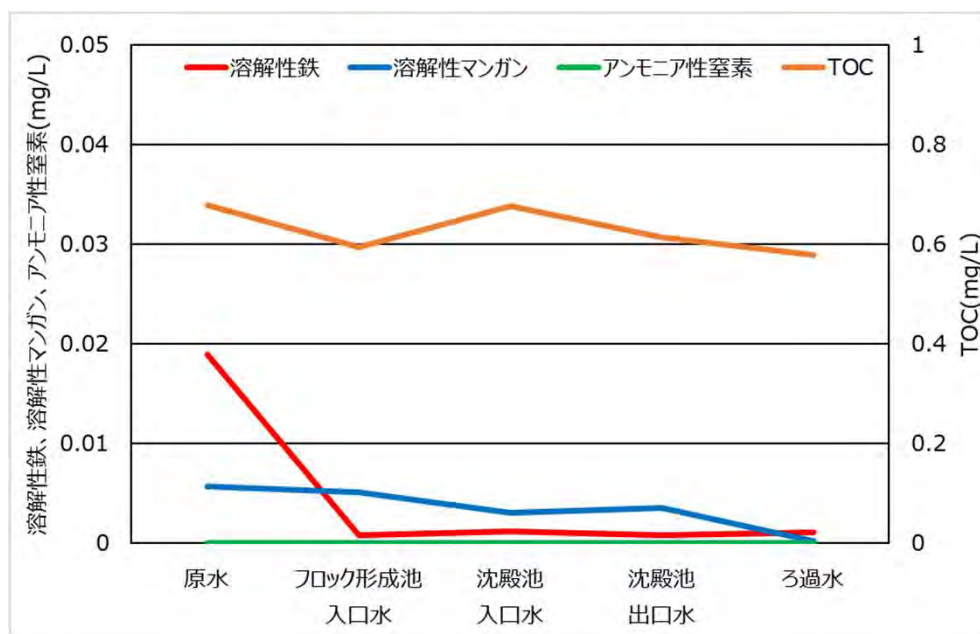
- 次亜塩素酸の分解に寄与が大きいUV-Bは最大で $0.6\text{mW}/\text{m}^2$ で、前日の比較対象日は南中となる正午付近でやや曇り紫外線も減少、実証試験日の方は紫外線が高めであった。



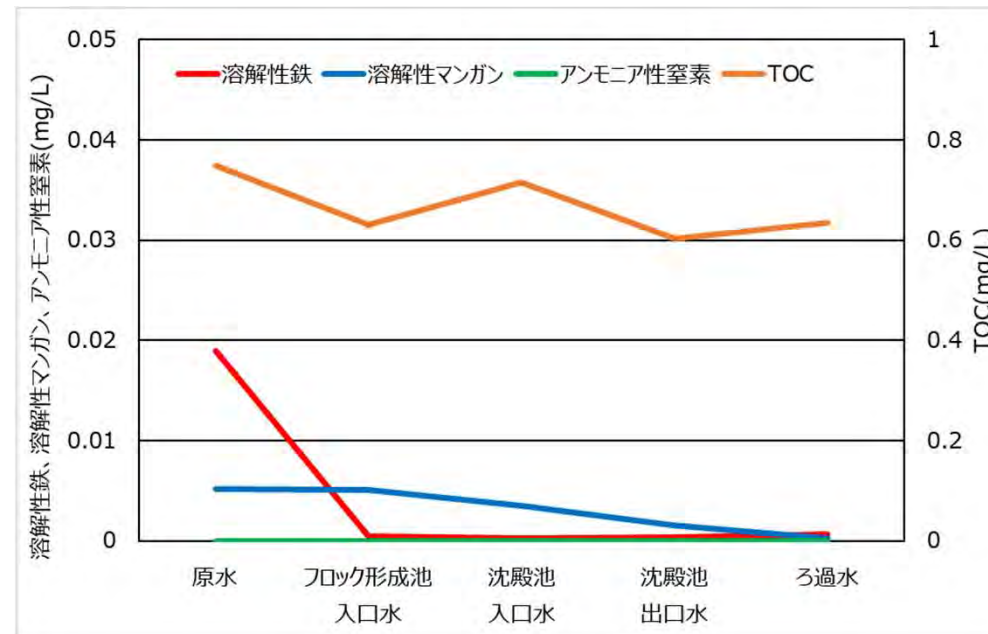
浄水場内紫外線量測定値

## 実機場検証 1) 前日との比較 プロセス内水質変化

- 浄水プロセス内の各水質項目のトレンドは、両日で特に相違は見られず塩素による処理性は同等であった。
  - 溶解性鉄は、前塩素でほぼ酸化が完了
  - 溶解性マンガンは、前塩素・中塩素とマンガン砂によりろ過池出口までに除去
  - TOCは、塩素との反応後も濃度の低下は見られず維持



前日 (比較対象)



実証試験日

### 浄水プロセス内水質手分析結果

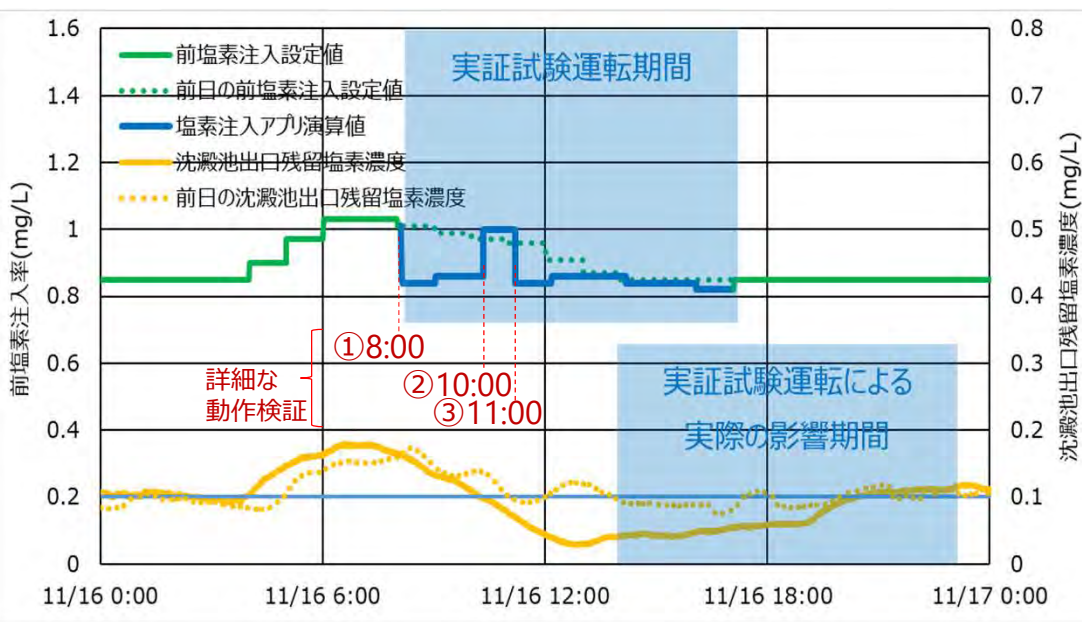
原水水質、紫外線量、プロセス内水質変化に前日と大きな差異はなく、動作検証時の比較対象として有効であることを確認

## 実機場検証 2) 運転結果検証 結果概要

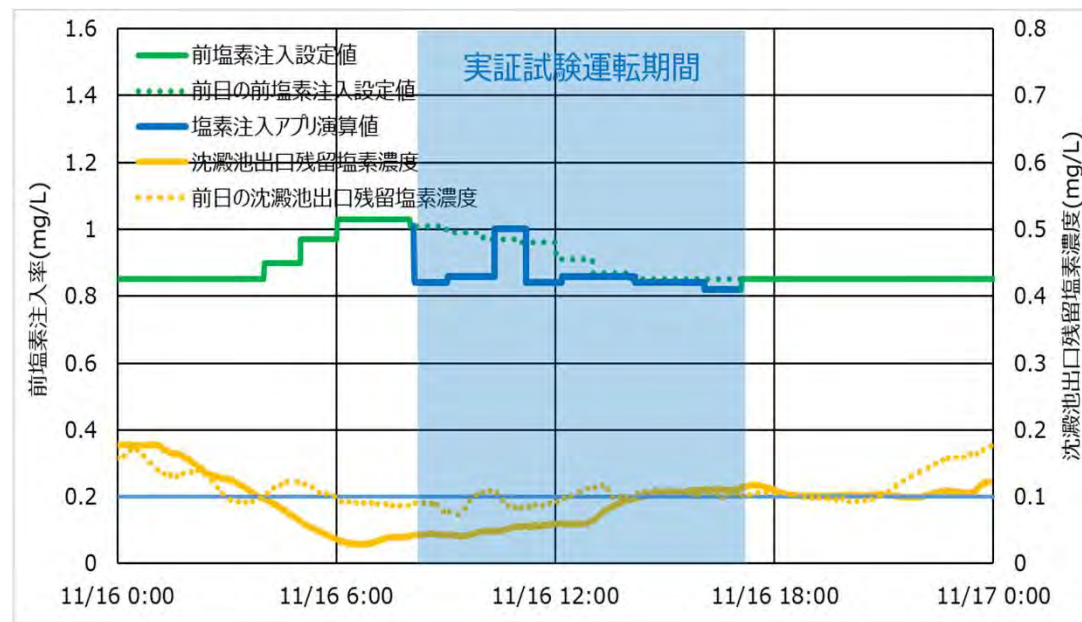
実滞留時間を考慮した場合（右グラフ参照）

- 運転試験開始前の同日0:00\*から6:00\*にかけて沈澱池出口残留塩素濃度が1.4mg/L近く低下しており、管理目標値の0.1mg/L（グラフ青のライン）より低い0.05mg/Lの状態から実証を開始。
- 試験開始から約6時間経過後\*、管理目標値0.1mg/Lに上昇し、その後は本値以上を維持した運転を継続。
- 制御目標値0.10mg/Lへの追従性を確認した。

\*実滞留時間を考慮



実証結果



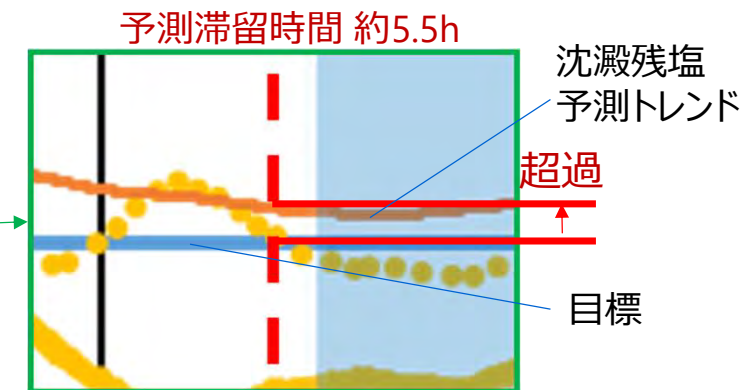
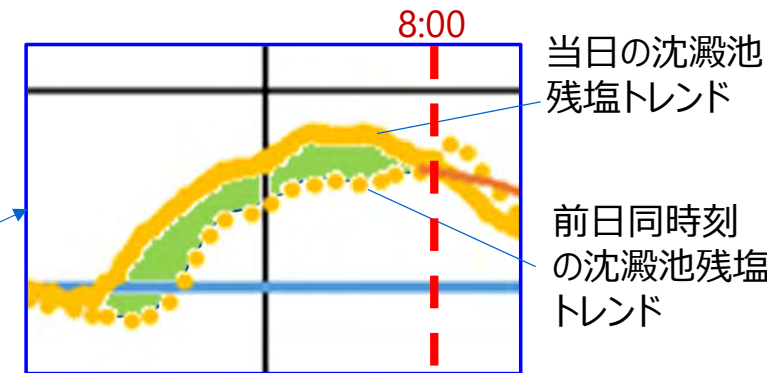
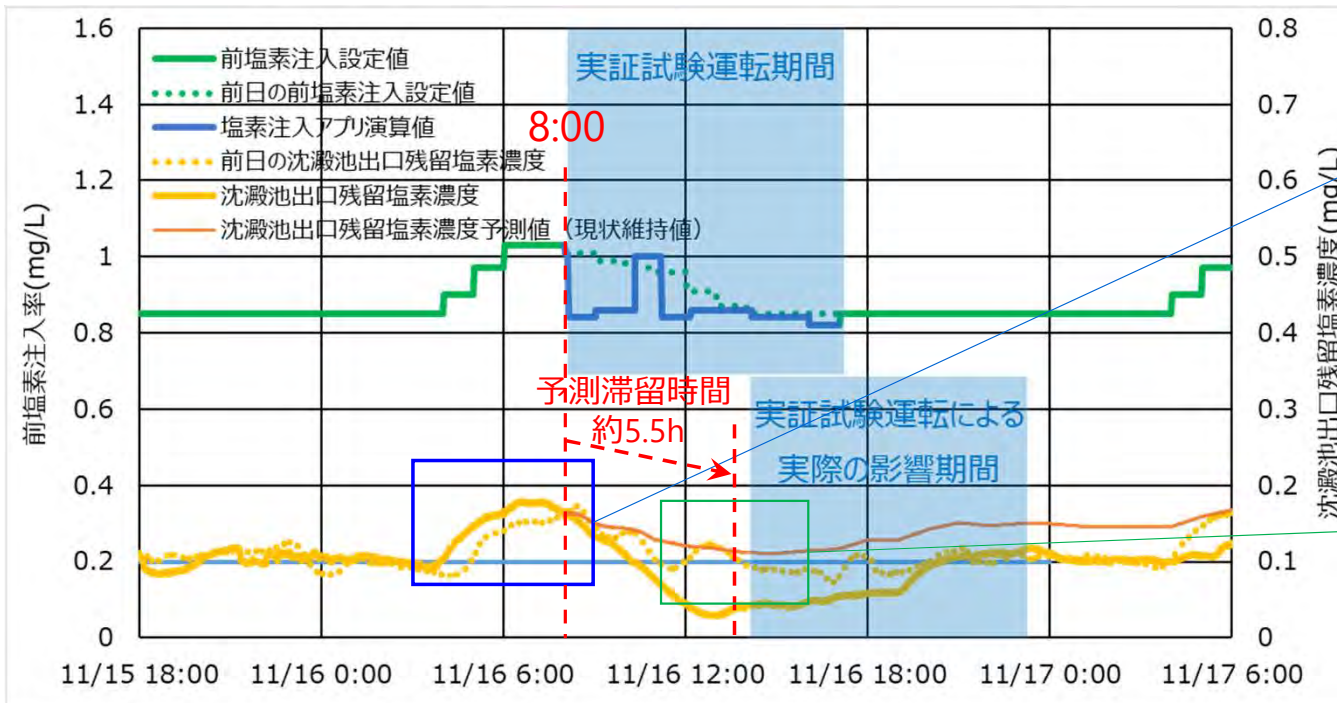
実滞留時間を考慮した実証結果

### 塩素注入率および残留塩素濃度トレンド

## 実機場検証 2) 運転結果検証 詳細な動作検証①

### ① 11/16 8:00 1.03mg/L → 0.85mg/Lを提示

- 運転試験開始前において、沈澱池出口残留塩素濃度は前日よりやや高い値を示している（青枠内緑部）。
- 塩素消費が前日と比較し少ないと予測し、現状の値を維持した場合に沈澱池残留塩素濃度は目標値を超過するとアプリケーションが判断し、塩素注入率を低減。



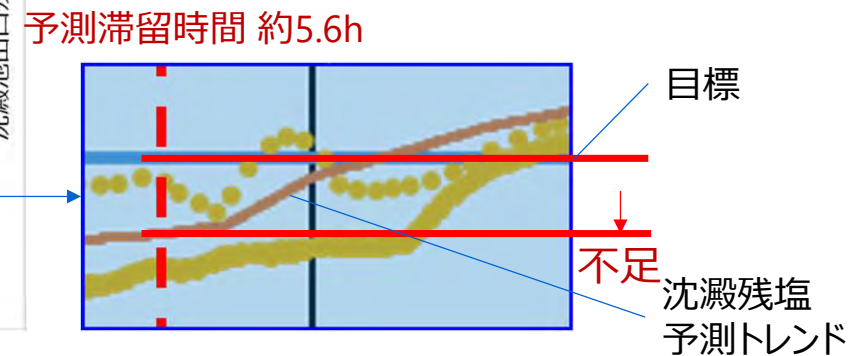
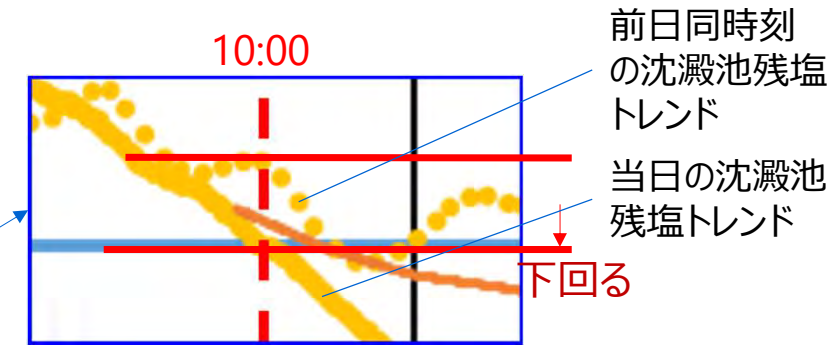
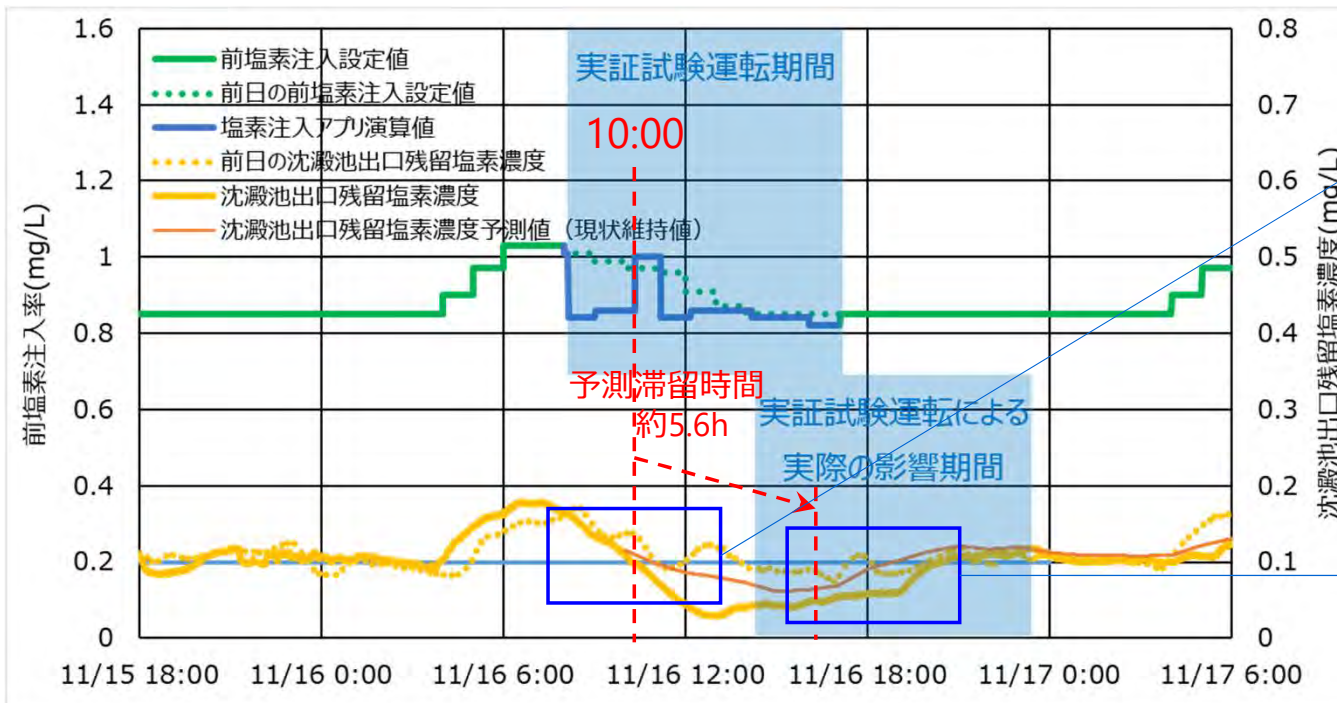


## 実機場検証 2) 運転結果検証 詳細な動作検証②

\*予測滞留時間=槽容積/原水流量で計算

### ② 11/16 10:00 0.86mg/L → 1.0mg/Lを提示

- 10:00現在の沈澱池残留塩素濃度が前日の同時刻の値と比べて下回っており、塩素消費が前日に比べ増加。
- 予測滞留時間後、現状の値を維持した場合、沈澱池残留塩素濃度が目標値を下回ると判断し、塩素注入率を増加。

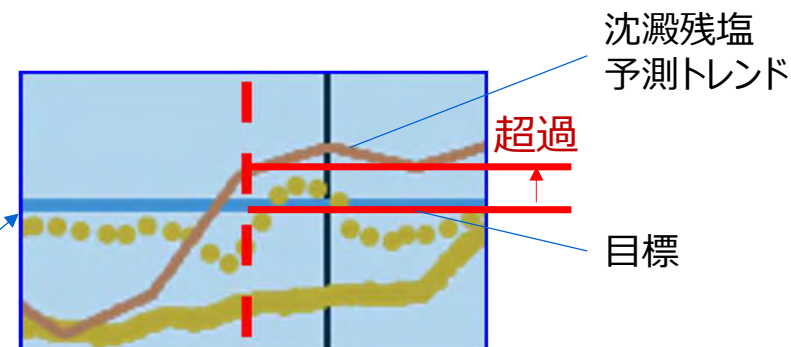
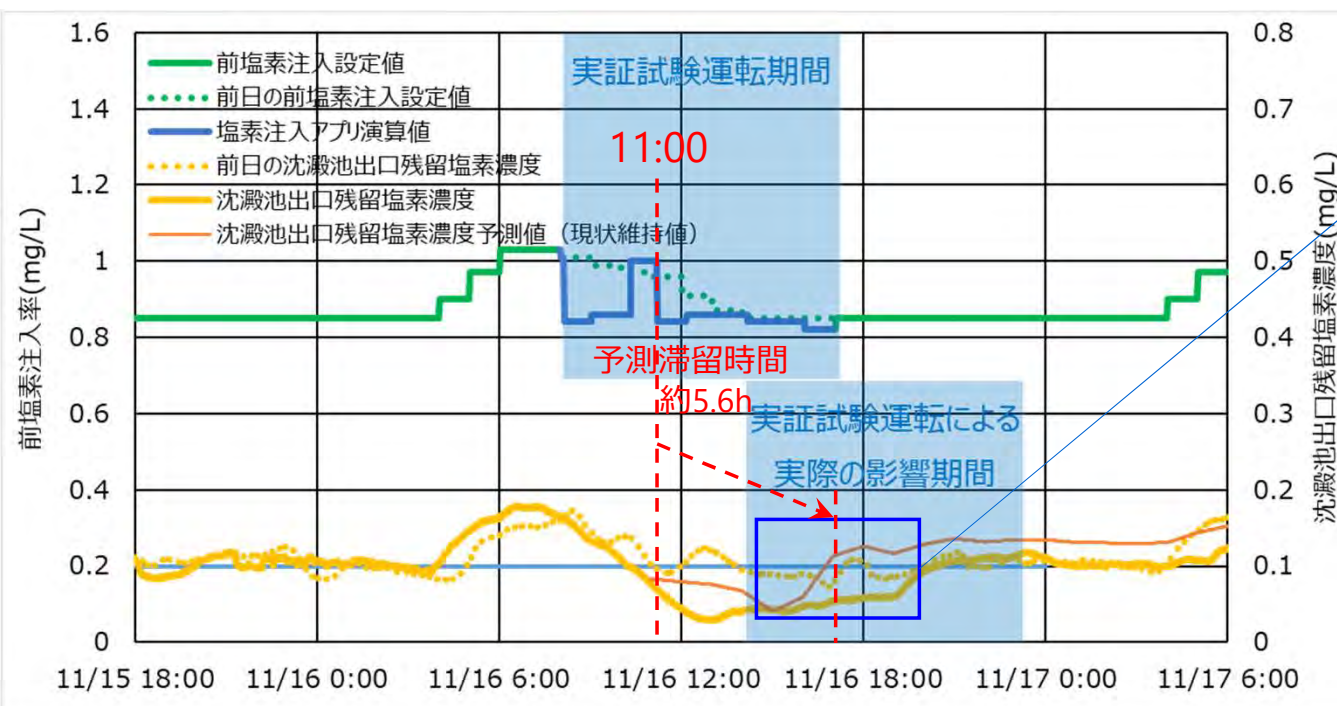




## 実機場検証 2) 運転結果検証 詳細な動作検証③

### ③ 11/16 11:00 1.0mg/L → 0.84mg/Lを提示

- 10:00に塩素注入率を増加させたことにより、予測滞留時間後の沈澱池残留塩素濃度が目標値を上回ると判断し、塩素注入率を低減。

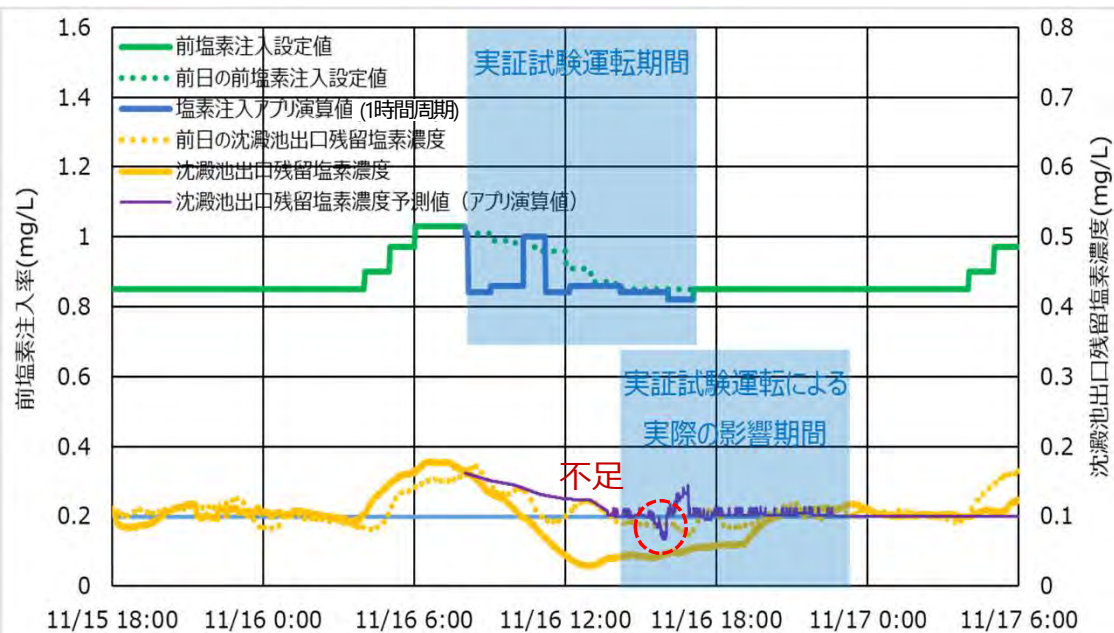


#### 実証試験結果 動作検証まとめ

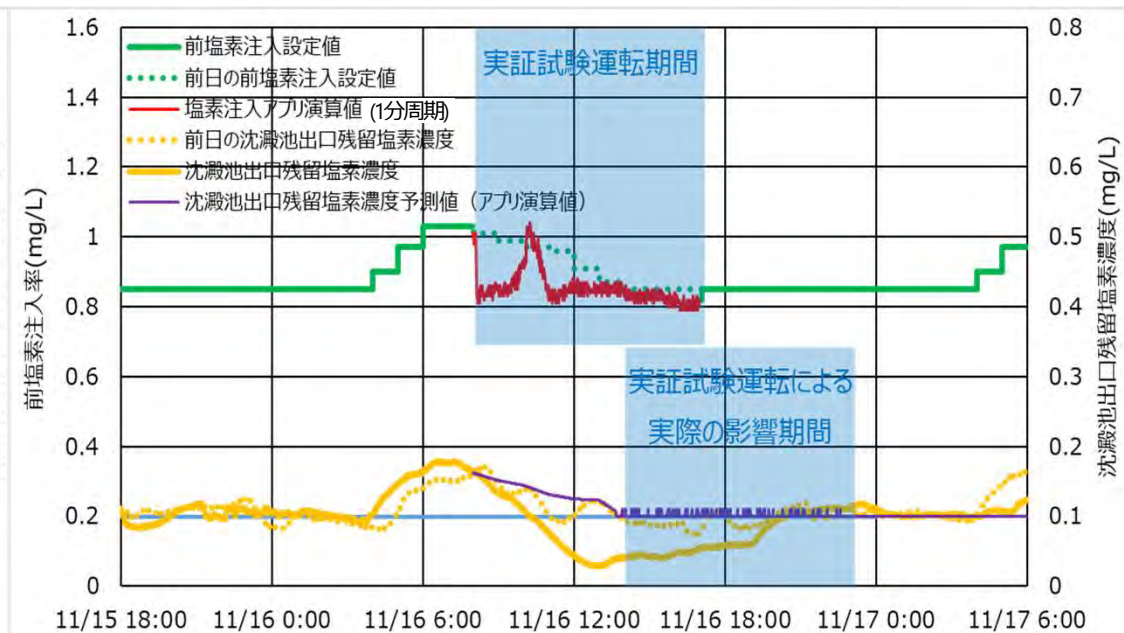
- 沈澱池出口残留塩素濃度は、開始直後は0.05mgであったが、約6時間後\*に目標値0.1mg/Lに回復、試験終了以降も維持
- 前日とほぼ同条件にも関わらず塩素消費増加したため、11/16 10:00～11:00にステップ的な注入率の上昇と下降が見られた

## 実機場検証 3) シミュレーション検証 1分周期で演算した場合の運転予測結果

- 1時間周期のアプリ演算値で塩素注入率を制御した場合、沈澱池出口残留塩素濃度予測値は制御目標値0.01mg/Lに対し一時的に不足が発生。
- 1分周期のアプリ演算値で塩素注入率を制御した場合、沈澱池出口残留塩素濃度予測値は常に0.1mg/L以上を維持。



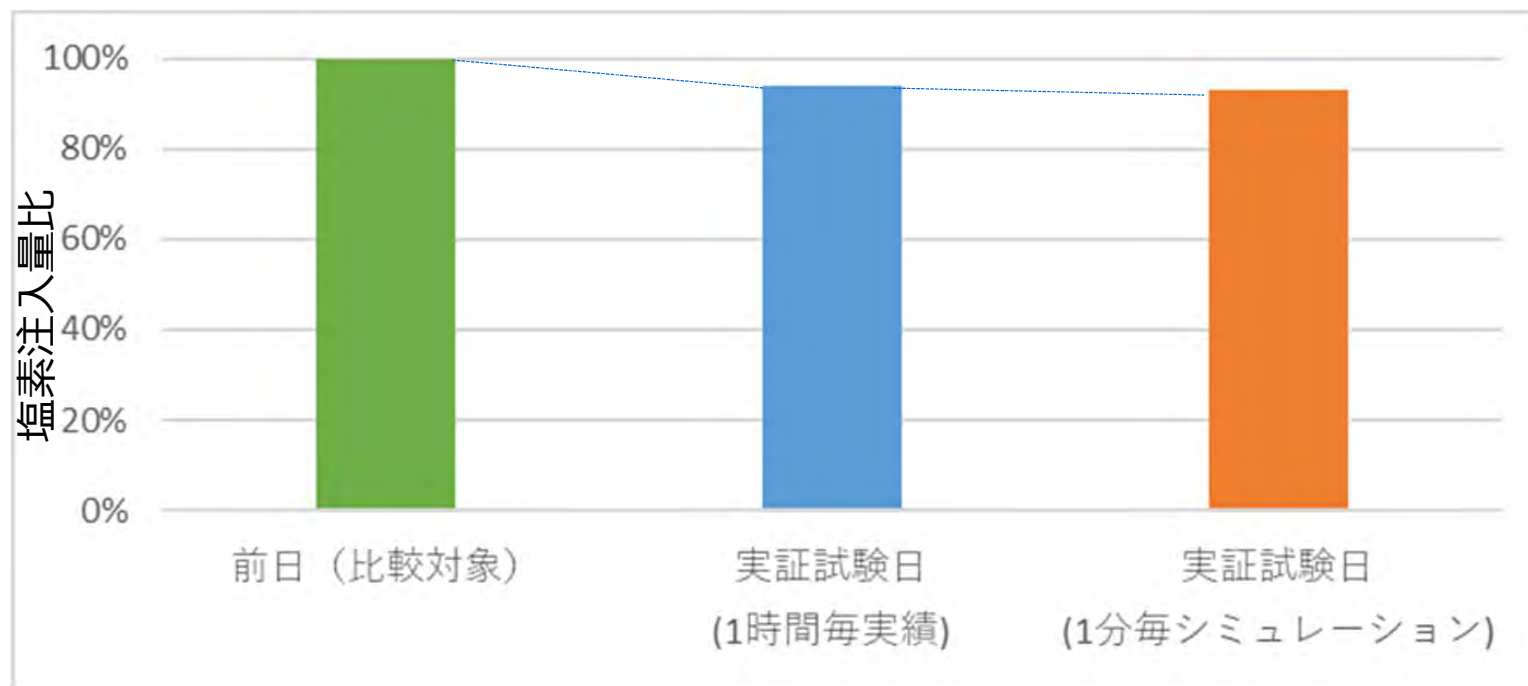
1時間周期のアプリ演算値で塩素注入率を制御した場合



1分周期のアプリ演算値で塩素注入率を制御した場合

## 実機場検証 3) シミュレーション検証 通常運転時との塩素注入量比較

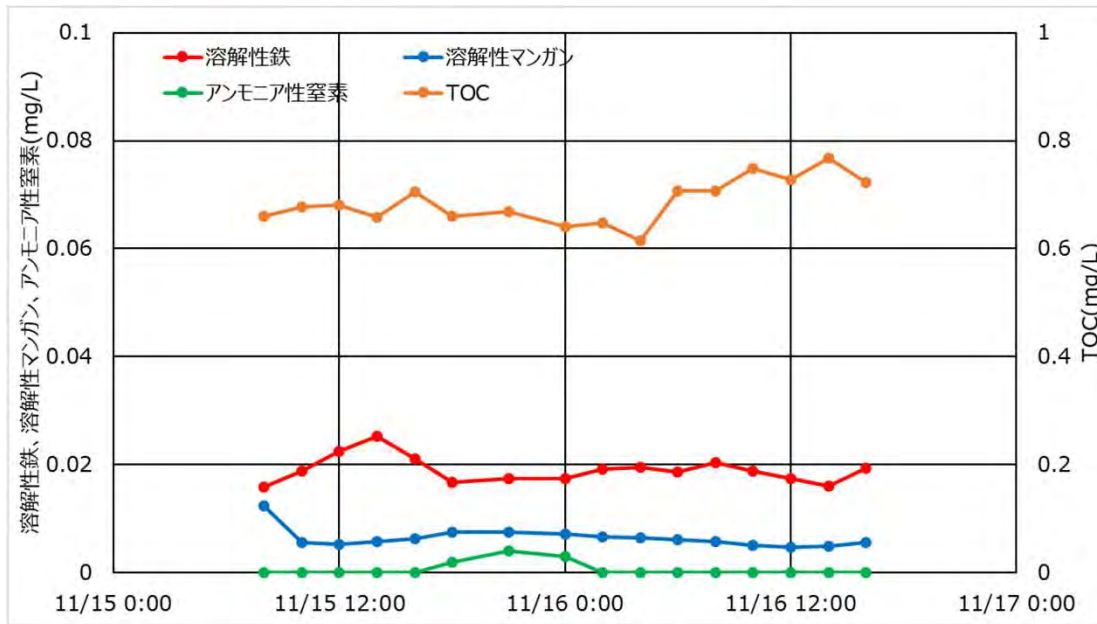
- 前日同時間帯のオペータによる運転と、塩素注入アプリ演算値との差異を比較した結果、1時間毎実績で6.1%、1分毎シミュレーションで7.2%の塩素注入量削減となった。  
※実証試験期間と同時間帯の塩素注入量を、処理水量比で補正した値で比較



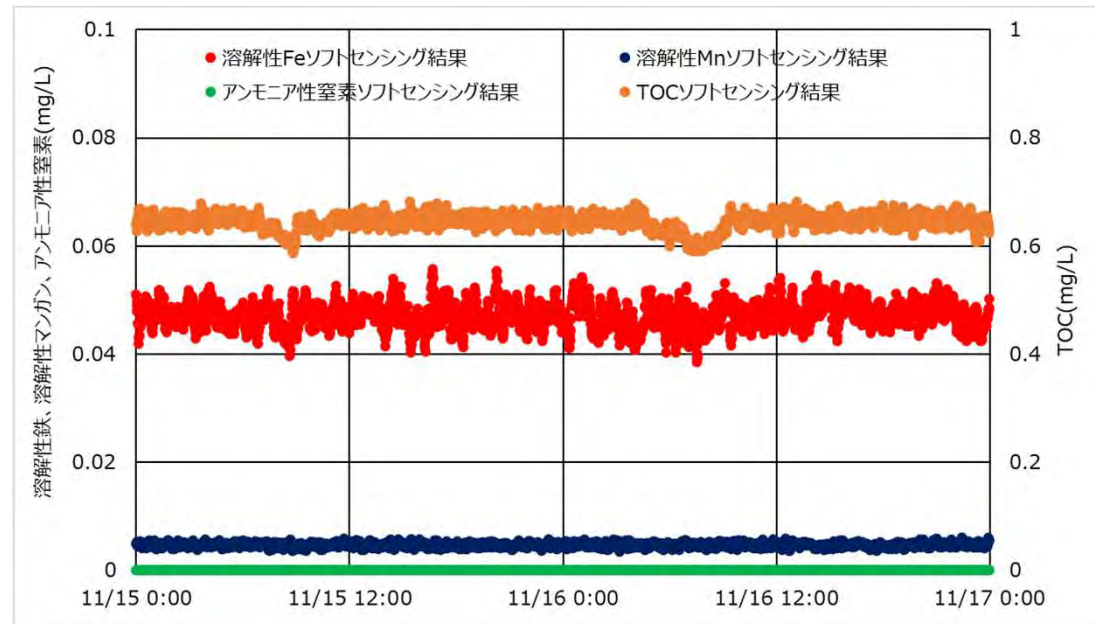
塩素注入量比較

## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 分析結果とソフトセンシングとの比較

- ソフトセンシングの数値は、TOC、溶解性マンガン、アンモニア性窒素は、実測値とほぼ同値
- 一方、溶解性鉄のみ実測値より2~3倍高めに演算  
→学習データが4点と少なく、夏秋(8~10月)の分析値に偏ったことによる影響と考えられる。



原水水質採水分析結果

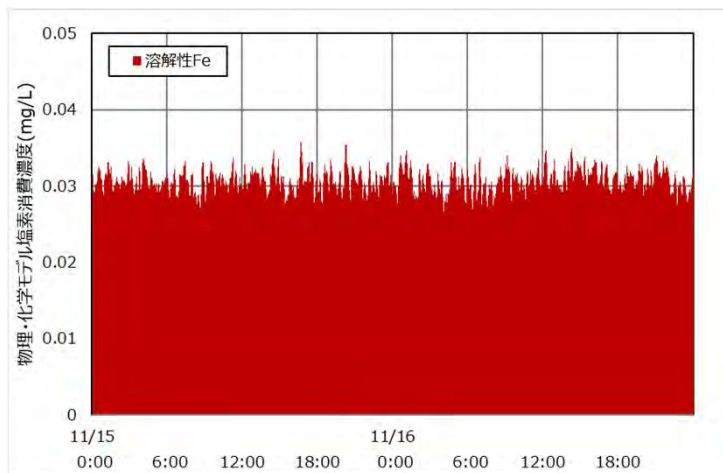


原水水質ソフトセンシング結果 (10分移動平均)

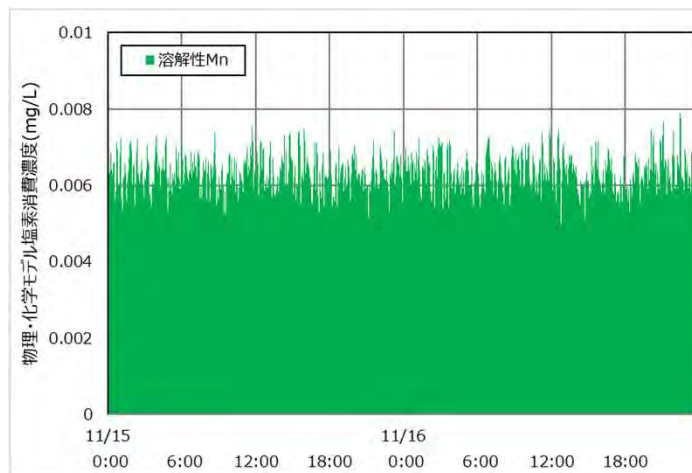


## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率①

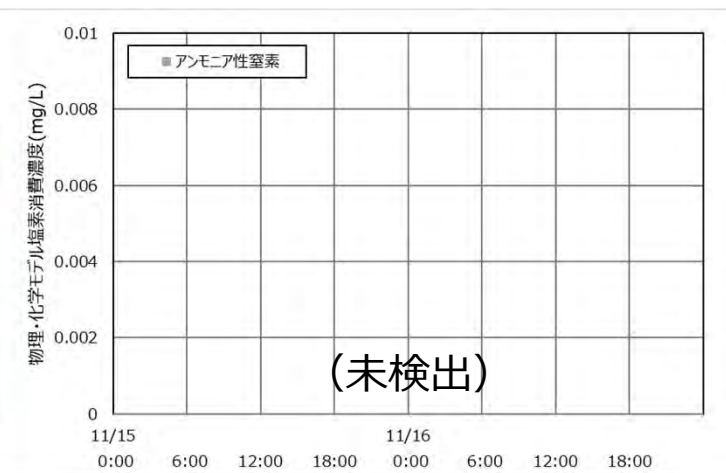
- ソフトセンシングによる原水中の無機成分の予測濃度に対する塩素消費は、溶解性鉄が0.03mg/L、溶解性マンガンが0.006mg/L、アンモニア性窒素は未検出（手分析における検出限界以下）と想定された。
- 溶解性鉄やアンモニア性窒素は、実測値とソフトセンシング結果に差異が確認されたが、濃度が低く塩素消費全体に対する比率が小さいため、注入率最適値の演算に影響が出なかったと考えられる。



溶解性鉄による塩素消費の  
経時変化



溶解性マンガンによる塩素消費の  
経時変化

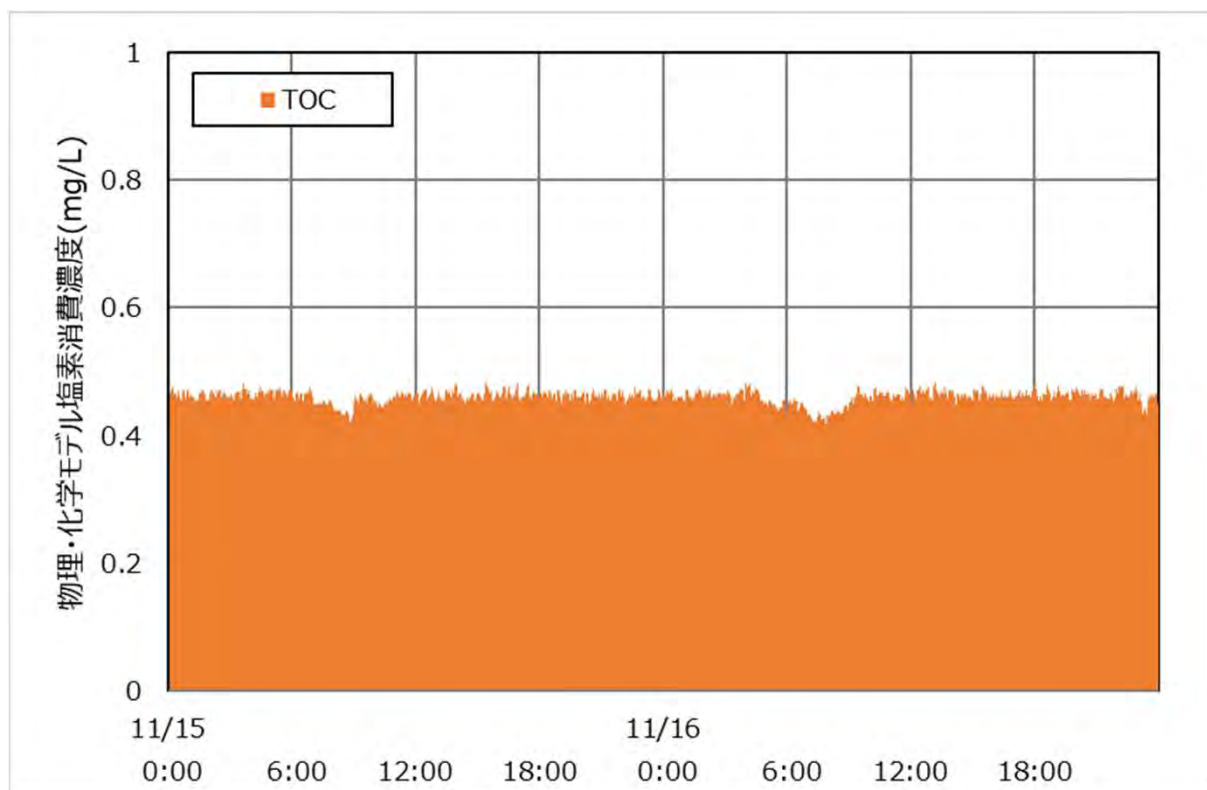


アンモニア性窒素による塩素消費の  
経時変化



## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率②

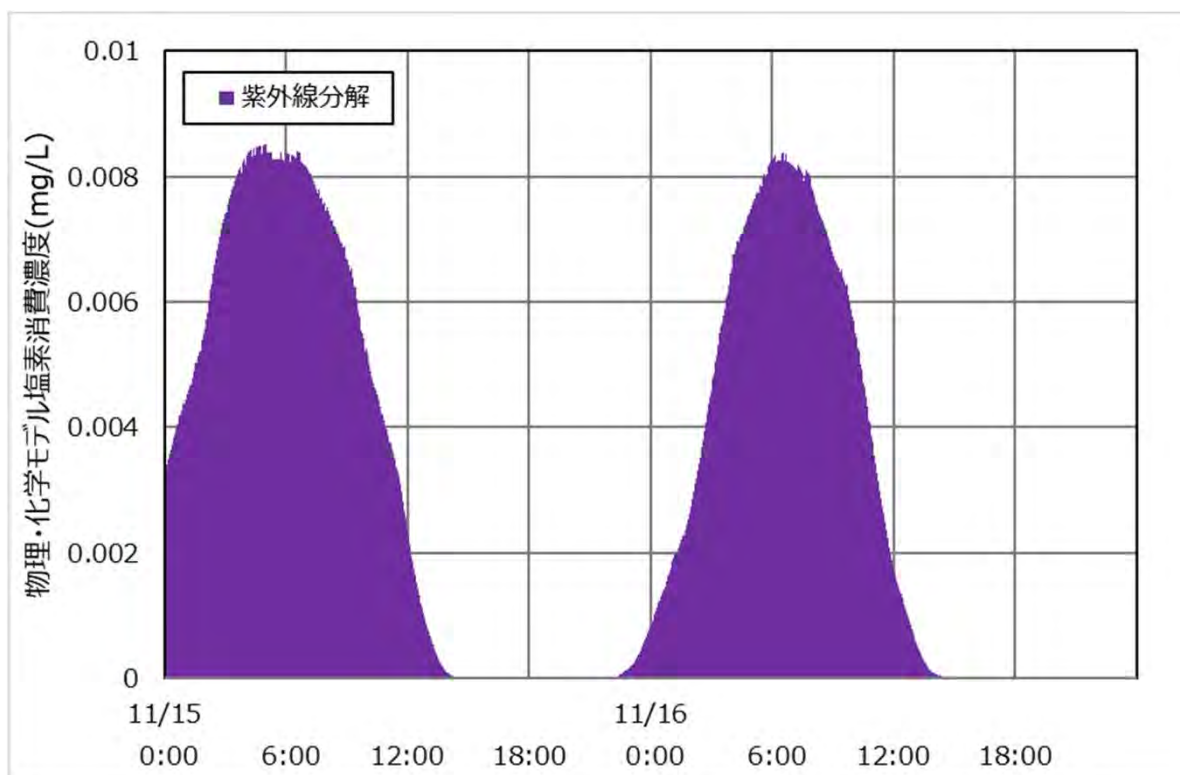
- 全体の塩素消費0.85mg/Lに対して、ソフトセンシングによるTOCの予測濃度による塩素消費は0.4~0.5mg/Lと大きく、有機物との反応による消費が支配的要因であると考えられた。



TOCによる塩素消費の経時変化

## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率③

- 実証試験直前のオペレータ運転時は日射補正で0.16mg/L加算されていたが、冬季は日中でも紫外線量が少ないため、紫外線分解は実証試験の時間帯で0.01mg/L未満と、影響は小さかったと考えられる。

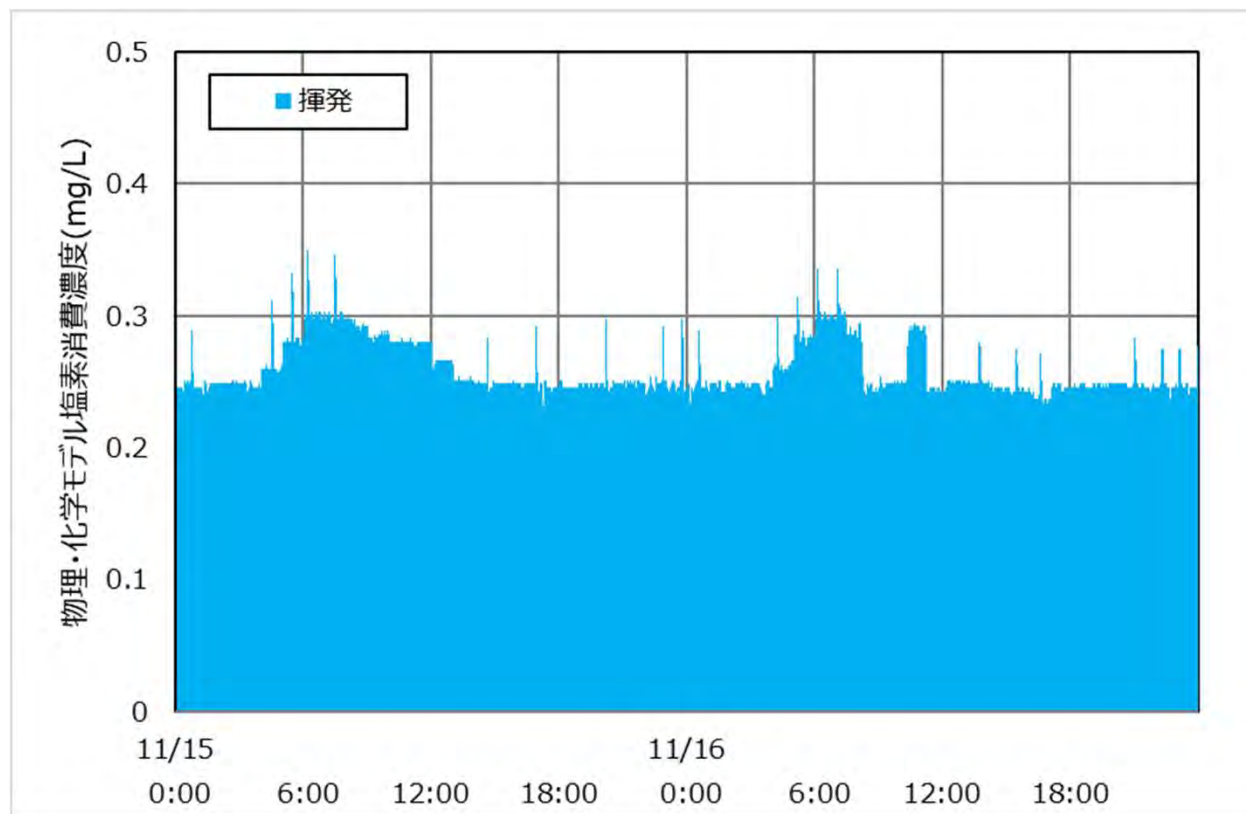


紫外線による塩素分解の経時変化

※沈澱池出口までに紫外線を受けて分解する塩素濃度をその水が着水井に流入した時刻にプロットしている

## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率④

- 着水井から混和池への開渠への落差部での揮発は、0.25~0.3mg/Lと比較的大きく塩素消費の要因として有機物に次いで影響が大きかったと考えられる。

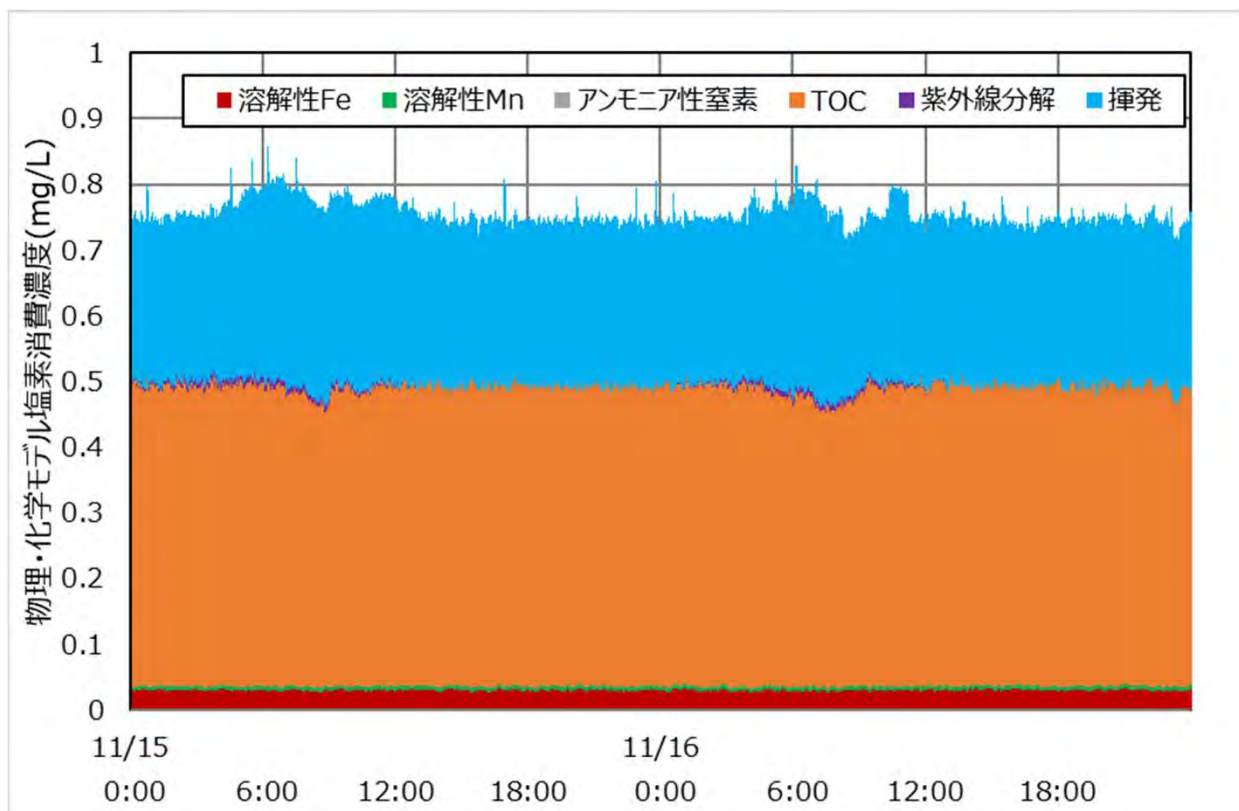


揮発による塩素消失の経時変化

※揮発のモデルは、実証機場に対して考察したものであり、現状のアプリケーションではブラックボックスモデルで補完している。

## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率⑤

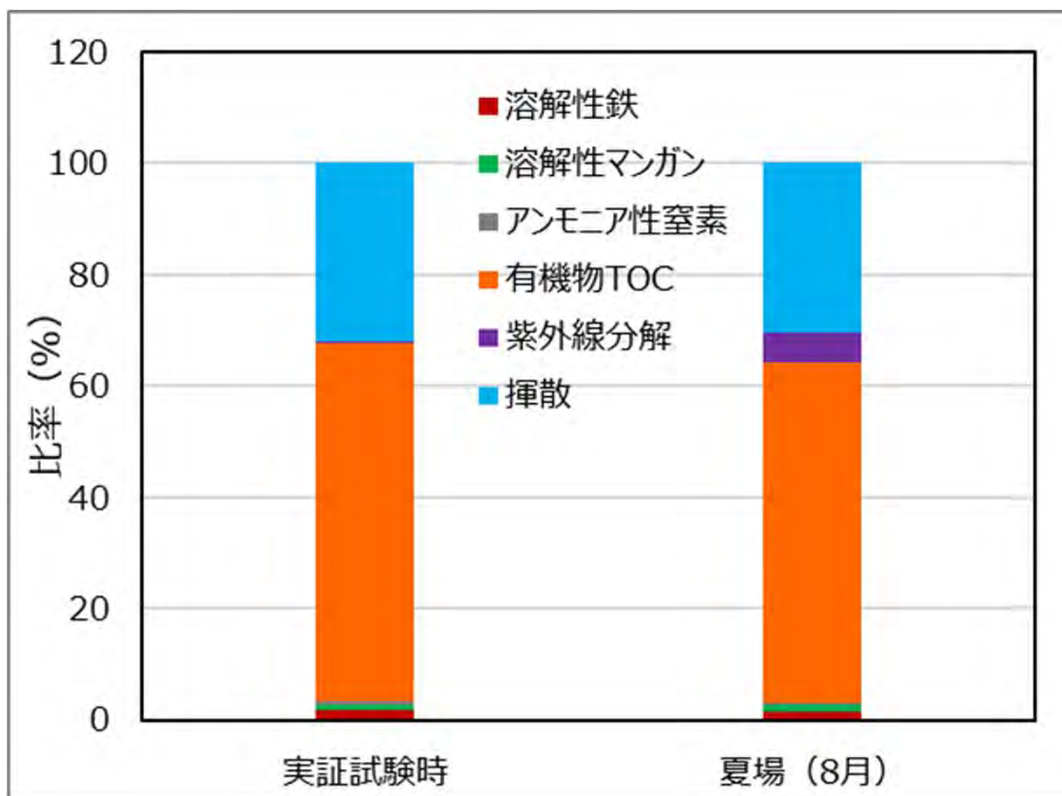
- 実証試験前日から当日にかけて、塩素消費要因比率はほぼ一定であったと考えられる
- TOC（有機物）による塩素消費が最も大きく全体の60%程度、次いで揮発が30%を占めていたと考えられた。



実証試験日塩素消費要因比率の経時変化

## 実機場検証 4) 塩素消費要因に関する考察 塩素消費要因比率⑥

- 参考データとして犀川浄水場における夏場（8月）の紫外線量データから紫外線最大時の分解量を算出すると、実証試験時と同じ原水水質であった場合、全体の5%程度を占めると考えられる。



夏季との塩素消費要因比率比較例



## 本章まとめ

研究目標		実施項目と成果
確認項目 ③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価 (現地実証試験)	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動に対する影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。
成果	最適値演算モデル評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩素注入アプリによる薬品注入コスト削減効果を検証した結果、最大で11.0%の年間コスト削減効果を試算した。</li> <li>沈澱池残塩濃度の管理値が低く設定することにより、合計塩素注入量を削減可能であることを確認した。</li> </ul>
	実機場による最適演算値運転実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>沈澱池出口残留塩素目標値0.10mg/Lとしてアプリケーション演算値で約1時間毎に手動で設定変更し、日中の9時間実証運転を実施した。</li> <li>沈澱池出口残留塩素濃度は、実証試験開始時は目標値0.10mg/Lを下回る0.05mg/Lであったが、約6時間後に目標値0.10mg/Lに回復し試験終了以降も維持した。</li> <li>アプリケーション演算値の運転で、塩素注入量は前日比較で6.1%削減できた。</li> </ul>

# 07

## WEB監視画面 －演算結果表示用PC－

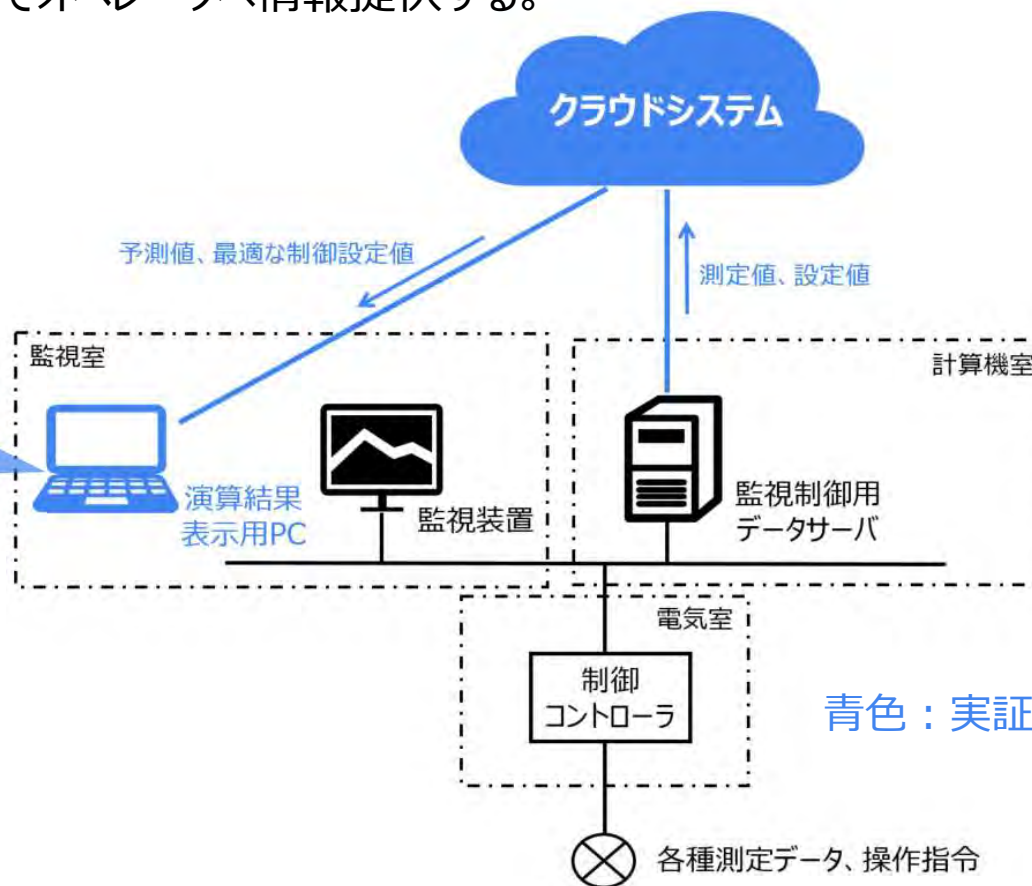
## システム概要

クラウドシステムで既存の監視制御システムから測定値や設定値を取得し、予測モデルにより予測値を演算する。また、予測モデルから最適な制御設定値を算出する。予測値および最適な制御設定値を演算結果表示用PC（本実証用として新規設置）へ表示することでオペレータへ情報提供する。



### 演算結果表示用PC

クラウドシステムにて演算した残留塩素濃度の予測値や塩素注入率の最適な設定値をGUI上に表示。



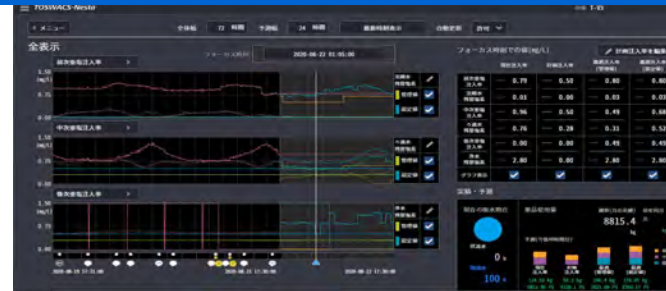
# 演算結果表示用WEB監視画面構成

## メニュー一覧



## 塩素注入率と残留塩素濃度、関連水质プロセス値、コストの表示画面

全表示画面  
前・中・後塩素注入率と残留塩素濃度の予測値・実績値を全て表示



個別表示画面  
前・中・後塩素注入率と残留塩素濃度の予測値・実績値を個別表示



## 設定画面

塩素注入率計画  
前・中・後塩素注入率の計画値設定

時間	前次塩素注入率 (mg/L)	中次塩素注入率 (mg/L)	後次塩素注入率 (mg/L)
0:00	1.1	0.9	0
1:00	1.1	0.9	0
2:00	1.1	0.9	0
3:00	1.1	0.9	0
4:00	1.1	0.9	0
5:00	1.2	0.9	0
6:00	1.2	0.9	0
7:00	1.2	0.9	0
8:00	1.2	0.9	0
9:00	1.2	0.9	0
10:00	1.2	0.9	0
11:00	1.2	0.9	0
12:00	1.2	0.9	0
13:00	1.2	0.9	0
14:00	1.2	0.9	0
15:00	1.2	0.9	0
16:00	1.2	0.9	0
17:00	1.2	0.9	0
18:00	1.2	0.9	0
19:00	1.2	0.9	0
20:00	1.2	0.9	0
21:00	1.2	0.9	0
22:00	1.2	0.9	0
23:00	1.2	0.9	0

共通設定  
塩素濃度(%)、単価(円/L)設定

# 演算結果表示用WEB監視画面 - 全表示画面 -

前・中・後塩素注入率と残留塩素濃度の予測値・実績値の全てと、想定塩素使用量とコストを表示

塩素注入率、残留塩素濃度の実績値を表示

将来の塩素注入率、残留塩素濃度の予測値を表示



将来時刻における複数の塩素注入率パターンと、それぞれに対応した残留塩素濃度の予測値を表示

現在時刻から24時間の複数の塩素注入率パターンによる想定塩素使用量とコストを表示

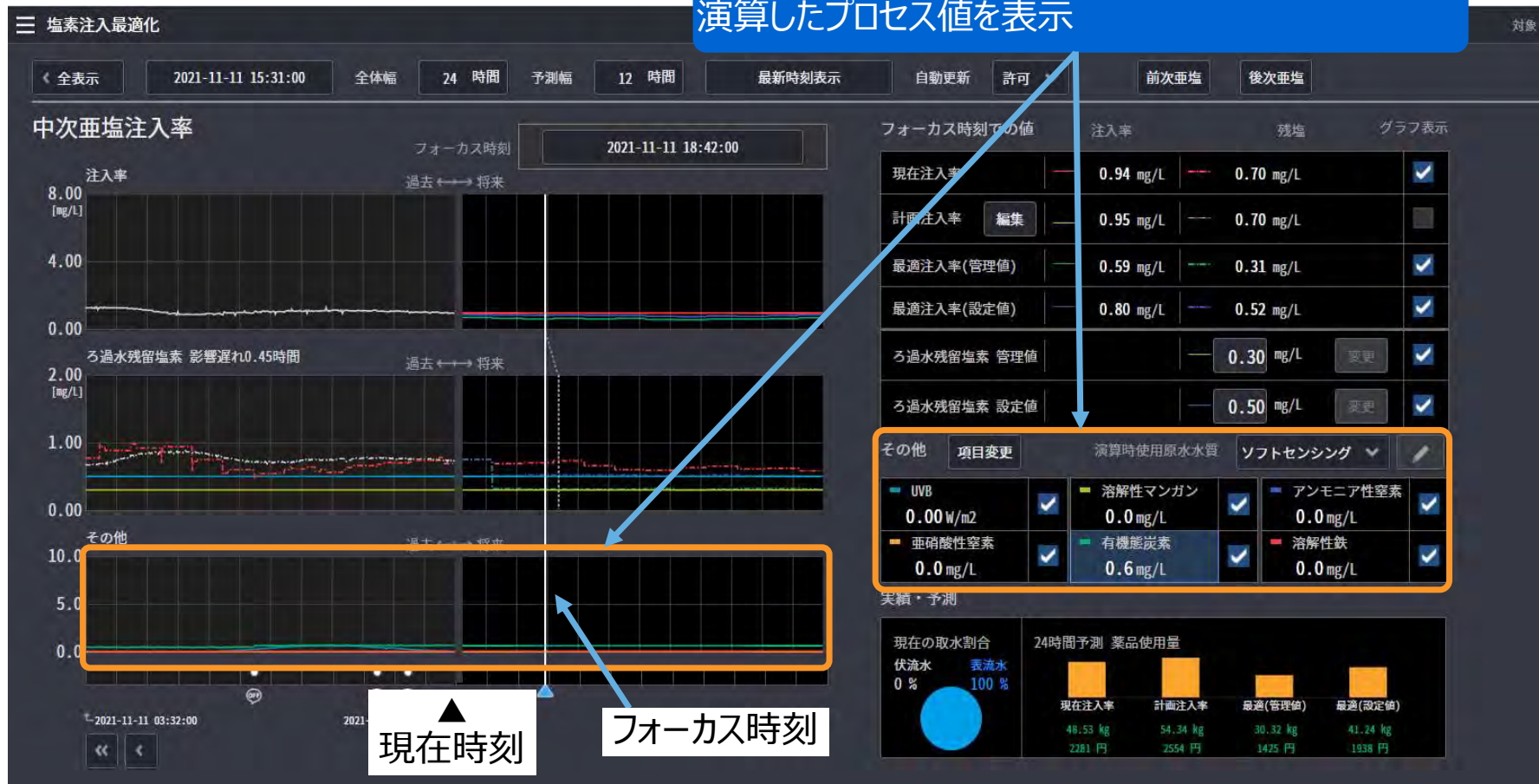


# 演算結果表示用WEB監視画面 - 個別表示画面 -

前・中・後塩素注入率と各残留塩素濃度の予測値・実績値の個別表示と想定塩素使用量とコストを表示

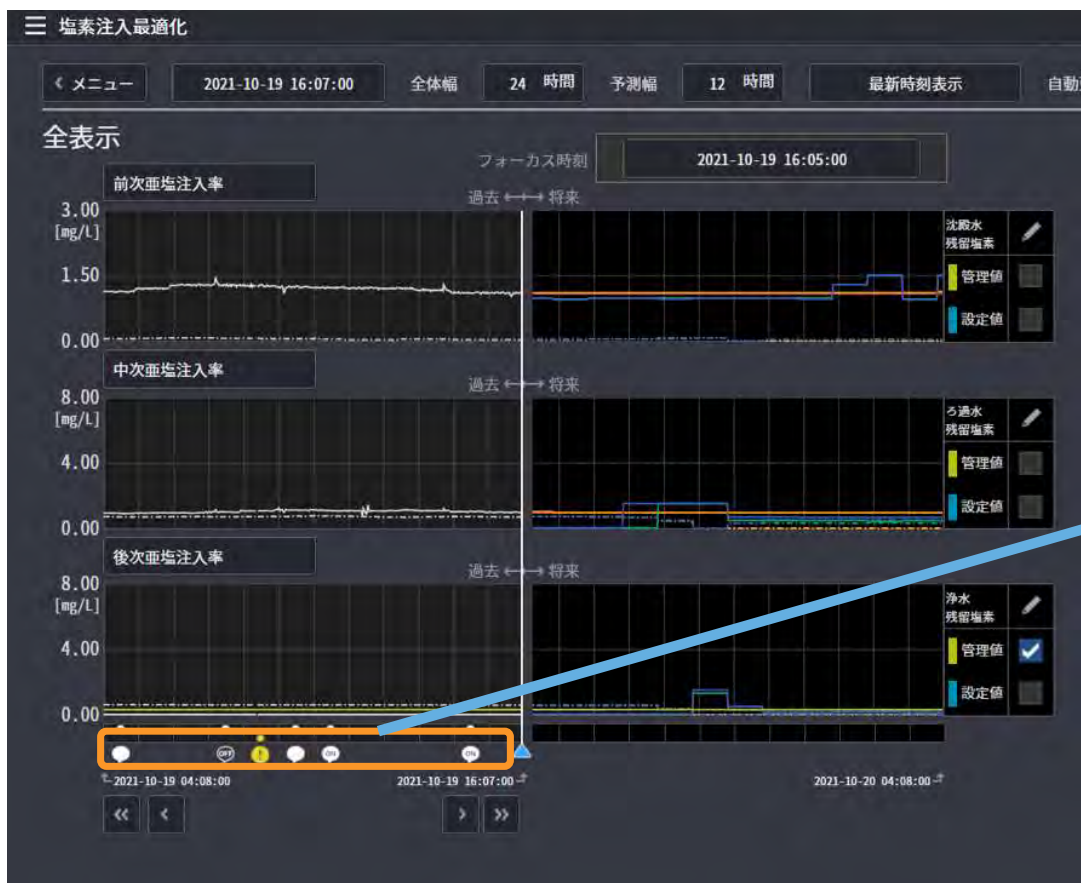
## 中塩素注入率表示画面

オンラインで測定できるプロセス値とソフトセンシングで演算したプロセス値を表示



## 演算結果表示用WEB監視画面 - コメント表示 -

演算で求めた最適注入率の増加・低下の変化時に、オペレータに増加・低下の妥当性をご判断いただくため、最適注入率が変化した要因をコメントで表示



コメント

期間： 2021-10-19 04:38:00 ~ 2021-10-19 05:37:00

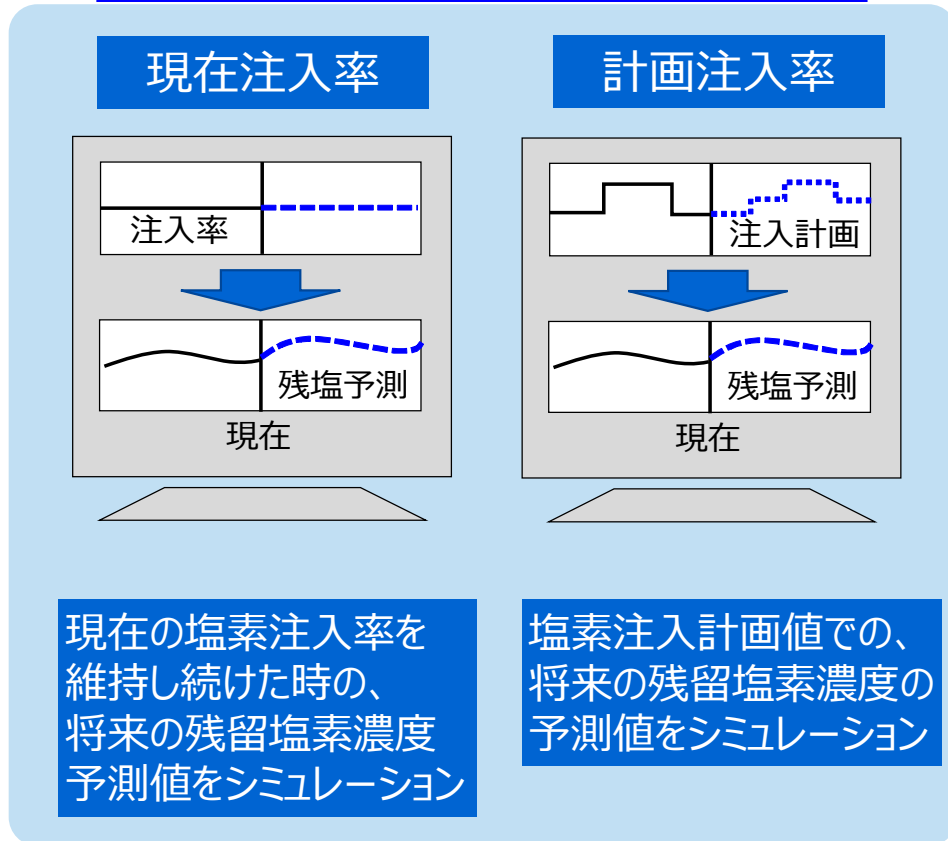
2021-10-19 04:50 ON 沈澱池出口残留塩素低

2021-10-19 04:52 OFF 沈澱池出口残留塩素低

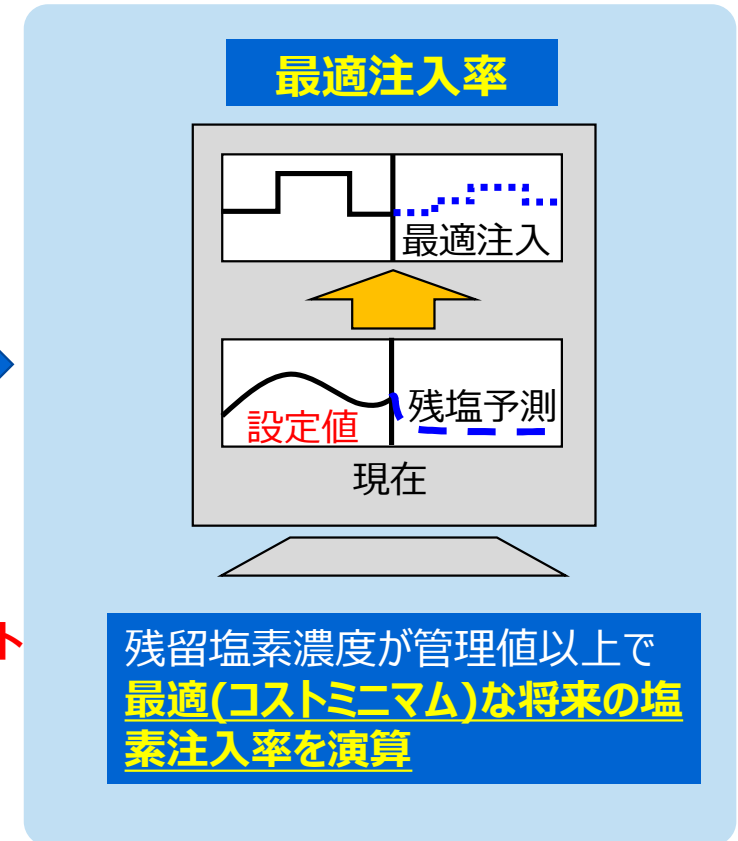
# 演算結果表示用WEB監視画面ユースケース

クラウドシステムで演算した最適な塩素注入率及びその注入率を適用した時の残留塩素濃度、塩素使用量（コスト）と、従来運用を想定したシミュレーション結果を比較することで、運転支援に活用

## 従来運用を想定したシミュレーション結果



## クラウドシステムで算出した最適な演算結果



- ・塩素注入率決定判断の負荷軽減
- ・塩素使用量のコスト最小化

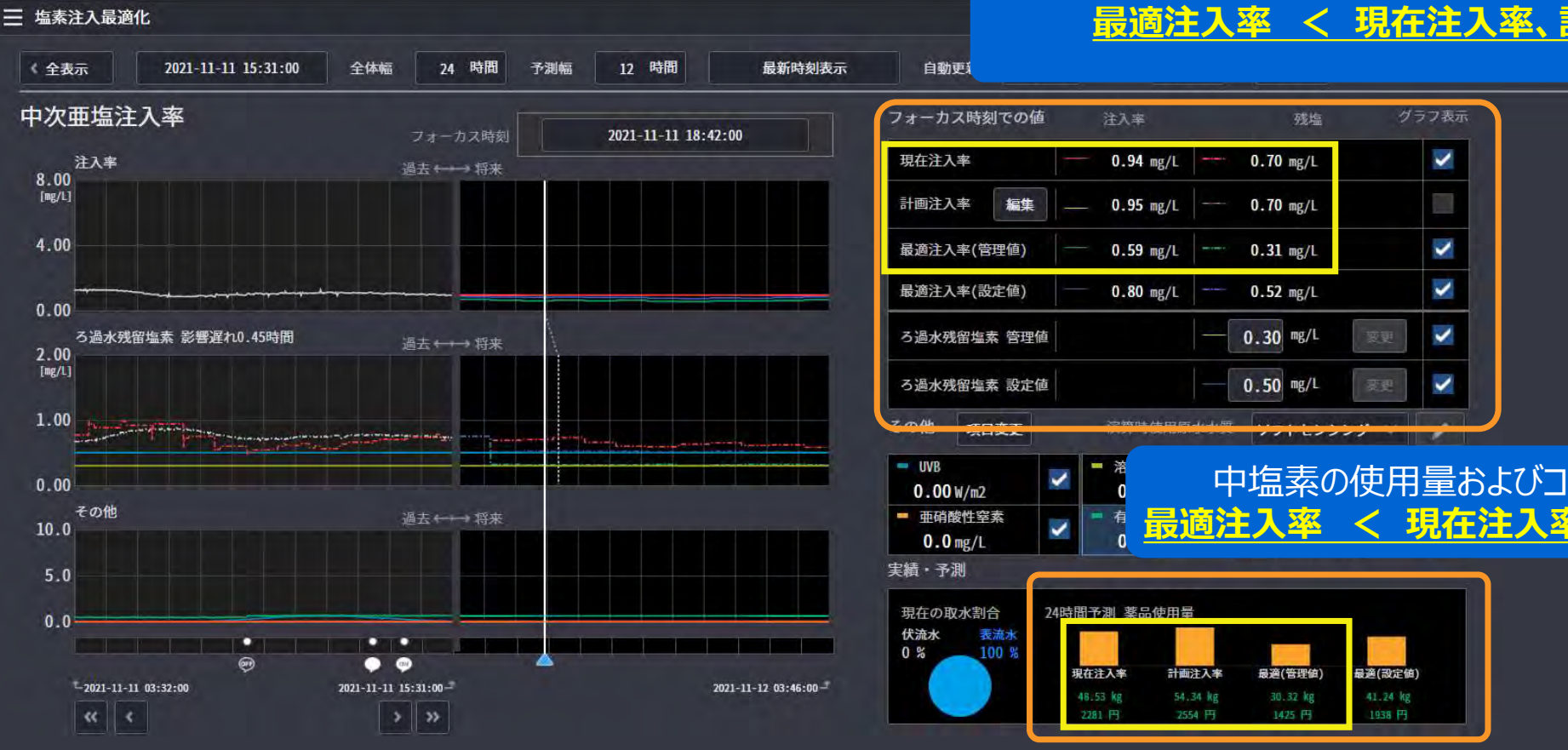


# 演算結果表示用WEB監視画面 —最適注入率・現在注入率・計画注入率の比較—

クラウドシステムで算出した最適な演算結果（最適注入率）と従来運用を想定したシミュレーション結果（現在注入率・計画注入率）を比較し、運転支援に活用

## 中塩素注入率表示画面

将来の最適な中塩素注入率・ろ過池残留塩素濃度を比較  
**最適注入率 < 現在注入率、計画注入率**



中塩素の使用量およびコストを比較  
**最適注入率 < 現在注入率、計画注入率**

# 08

まとめ



## まとめ 確認項目①

研究目標		実施項目と成果
確認項目①	原水水質、日射量等による塩素消費モデルの検証 (オフライン検証)	前塩素・中塩素・後塩素注入後の有効塩素に関して、原水に含まれる無機・有機成分との反応、および日射・UVによる分解反応、場内プロセスにおける塩素消費演算結果と実測値を比較し、塩素消費モデルを検証する。
成果	塩素消費物理・化学(ホワイトボックス)モデルを立案し検証	<ul style="list-style-type: none"><li>・無機物、有機物との反応、紫外線による分解、揮発放散による消失モデルを組合せ、塩素消費ホワイトボックスモデルを立案し、実測値と比較・検証</li><li>・塩素注入率に対し、滞留時間に基づいて各ポイントにおける残留塩素濃度の予測値が算出可能となった。</li></ul>

## まとめ 確認項目②

研究目標		実施項目と成果
確認項目②	AIによるソフトセンシングモデルの検証 (オフライン検証)	オンラインで得られていない複数の塩素消費モデル入力値を、AI技術を活用したソフトセンシングモデルによりオンライン推定し、推定結果と手分析結果を比較し、最適なモデル構築およびモデルパラメータ最適化手法を検証する。
成果	ソフトセンシングモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 原水水質推定において、非定常時も取り得る範囲内での出力結果が得られた。</li> <li>• ろ過水残留塩素予測において、ソフトセンシングなしと比較し、線形計画法とランダムフォレストいずれの手法も予測精度が改善。</li> <li>• アプリ上ではいずれかの手法を実装。評価結果より精度面においては両者は同等。</li> <li>• 安定性の面では線形計画法、計算速度の面ではランダムフォレストが有効で、採水データ数やサーバスペックなど導入先機場の状況に合わせて使い分けが可能。</li> <li>• 誤差補正モデルにより残留塩素濃度予測精度の向上が可能。</li> </ul>
	誤差補正モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 誤差補正により、誤差補正なしの場合と比較して最大で年間平均46.2%のろ過水残塩濃度予測の精度改善を確認。</li> <li>• 荒天時や薬注設備更新期間など、誤差補正による予測精度が向上した。</li> <li>• 補正手法1より補正手法2の方が精度向上し、補正手法2が有効と考えられた。</li> </ul>

## まとめ 確認項目③

研究目標		実施項目と成果
確認項目③	塩素注入量予測および塩素注入最適値演算手法の有効性評価 (現地実証試験)	浄水場の各ポイントにおける残留塩素濃度の管理目標値に対して最適値演算モデルに基づく塩素注入率が適正か、季節や天候の変動に対する影響や技術的知見に基づき多角的に検証する。
成果	最適値演算モデル評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩素注入アプリによる薬品注入コスト削減効果を検証した結果、最大で11.0%の年間コスト削減効果を試算した。</li> <li>沈澱池残塩濃度の管理値が低く設定することにより、合計塩素注入量を削減可能であることを確認した。</li> </ul>
	実機場による最適演算値運転実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>沈澱池出口残留塩素目標値0.10mg/Lとしてアプリケーション演算値で約1時間毎に手動で設定変更し、日中の9時間実証運転を実施した。</li> <li>沈澱池出口残留塩素濃度は、実証試験開始時は目標値0.10mg/Lを下回る0.05mg/Lであったが、約6時間後に目標値0.10mg/Lに回復し試験終了以降も維持した。</li> <li>アプリケーション演算値の運転で、塩素注入量は前日比較で6.1%削減できた。</li> </ul>





実証試験にご協力いただいた公益財団法人水道技術研究センターの皆様、  
長野市上下水道局犀川浄水場の皆様に厚くお礼申し上げます。

**TOSHIBA**