

第2章 技術の概要と評価

第1節 技術の概要

§ 5. 技術の背景と目的

本技術はAIを用いた雨天時運転ガイダンスならびに予測技術により、ポンプ運転操作の効率化を図り、下水処理場設備の水没・浸水を回避し、汚泥流出リスクを縮減することを目的とする。

【解説】

分流式下水道を採用している都市では、施設の老朽化の進行や地震等の被災、高強度降雨の増加等に伴い、降雨時に管内に雨水が流入して下水の流量が増加し、汚水管等からの溢水や室内への逆流等が発生している。このため、雨天時浸入水は、下水道を管理する地方公共団体にとって解決すべき課題であると認識されているものの、必ずしも十分な対策がとられているとは言えない状況である。

国土交通省では、平成30年度に分流式下水道を採用する地方公共団体を対象として雨天時浸入水に関するアンケート調査を行っている（図2-1）。その結果によると、回答数2,962処理区のうち、半数以上である1,681処理区（約57%）が「維持管理上の課題あり」と回答しており、雨天時浸入水に関する事象の発生が全国的な課題となっていることが示唆されている。

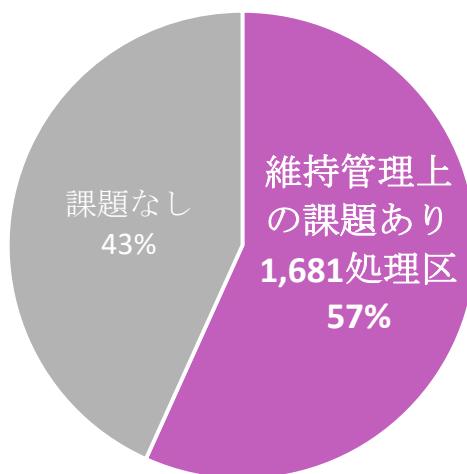


図2-1 雨天時浸入水に関するアンケート調査結果

分流式下水道を採用する地方公共団体回答数：2,962処理区（H30年度、国土交通省）

この課題に対し、国土交通省では、令和2年1月に「雨天時浸入水対策ガイドライン（案）」を作成し、本事象に対する対策として「発生源対策」「運転管理による対策」「施設対策」に関して対策を纏めている。「発生源対策」「施設対策」に関しては具体的な対策案が提示されている一方で、「運転管理による対策」に関しては、概念的な対策が記載されているのみで、具体的な対策は各自治体・処理場に一任されている状況である。

一方で下水道部門の職員数は、平成30年度時点でのピーク時（平成9年度）の約6割まで減少しており、下水道部門の職員数は地方公務員全体の減少率を上回るペースで減少している状況である（図2-2）。熟練技術者のノウハウ継承は喫緊の課題と言える。

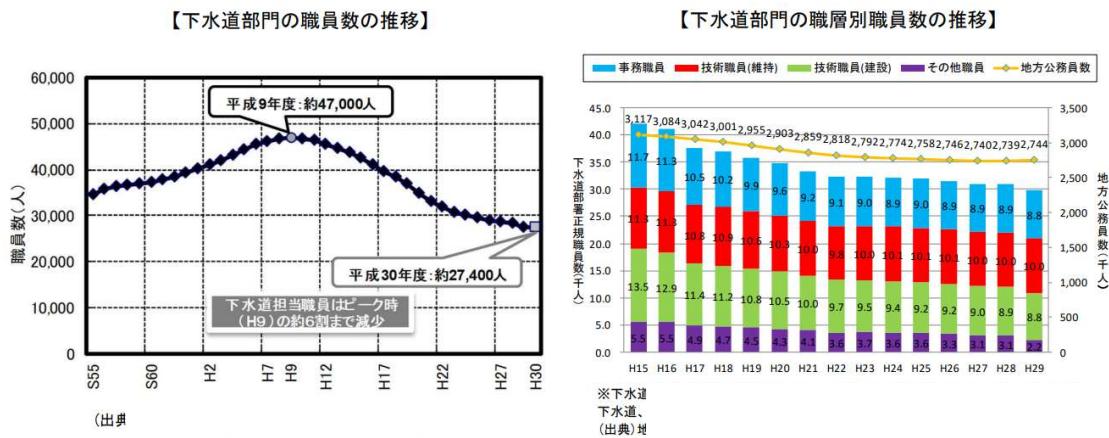


図2-2 下水道部門の職層別職員数の推移

（「人口減少下における維持管理時代の下水道経営のあり方検討会」 報告書より
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001371608.pdf>）

そこで本研究ではAI技術を活用し、流入水等から下水処理場の対応判断や運転操作等のガイダンスを実施することにより、下水処理場設備の浸水・汚泥流出・水質事故・契約電力量値超過等を回避することが可能となるかを検証する。

§ 6. 本技術の概要と特徴

本技術は、XRAIN等の降雨データや既存の場内・場外監視制御装置からのデータをAI技術により解析し、ポンプの最適な運転操作をガイダンスし、各種予測値を出力するものである。

【解説】

本技術は、XRAIN等の降雨データや既存の場内・場外監視制御装置からのデータをAI技術により解析し、ポンプの最適な運転操作をガイダンスし、各種予測値を出力するものであり、本技術のシステムは、雨天時運転ガイダンス装置、場内系監視制御装置及び場外系監視制御装置により構成される。

今回構築する雨天時運転ガイダンスシステムのシステム構成図と提供機能を図2-3に示す。

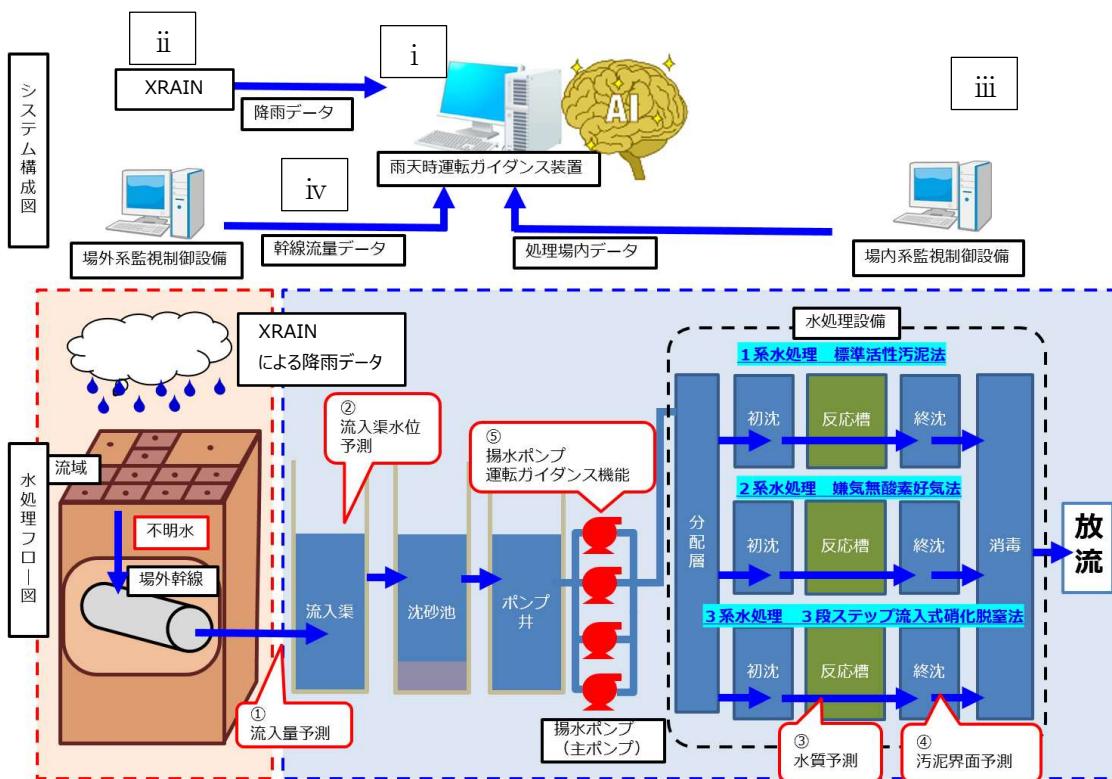


図2-3 雨天時運転ガイダンスシステムのシステム構成図と提供機能

システム構成

i) 雨天時運転ガイダンス装置

AI技術を活用し、雨天時における流入量等の予測値から下水処理場（揚水ポンプ）の運転をガイダンスする装置。具体的な提供機能は①～⑤とし、各詳細機能は次頁以降に示す。

- ① 流入量予測機能…幹線流量データや降雨データから処理場内への流入量を予測する機能
- ② 流入渠水位予測機能…①で得られた流入量と、ガイダンス値である揚水量から水位の変動を予測する機能
- ③ 水質予測機能…微生物の活動に伴う物質の収支を組み合わせて表現する活性汚泥モデル（ASM）を構築し、処理水質を予測する機能
- ④ 汚泥界面予測機能…Vesilind沈殿モデルに基づき最終沈殿池の流入と引抜のバランスから汚泥界面の高さを予測する機能
- ⑤ 揚水ポンプ運転ガイダンス機能
…「水位」「コスト」「放流水質」といった雨天時に考慮すべき事項をバランス良く実現するため、AI技術である多目的最適化を適用し、最適な揚水ポンプの運転操作をガイダンスする機能

ii) XRAIN

XRAIN（eXtended RAdar Information Network：高性能レーダ雨量計ネットワーク）は、全国各地のレーダ雨量計の観測値を元に、解析・合成処理を行い250mメッシュ間隔で雨量データを配信している。

iii) 場内系監視制御装置

下水処理場内の監視制御を実施している装置。本装置より雨天時運転ガイダンスシステムに必要データを送信する。必要なデータに関しては第2章第3節に記載している。

iv) 場外系監視制御装置

下水処理場外の監視制御を実施している装置。下水処理場外にある各種流量計のデータを雨天時運転ガイダンスシステムの流量予測演算用のデータとして送信する。

提供機能

① 流入量予測機能

下水処理場に到達する流入量をリアルタイムに予測する機能である。流入量予測技術は過去の降雨データと処理場への流入量データがある場合、そのデータから予測を実施する。一方、処理場への流入量データは計測していない場合も多い。よってここでは過去の流入渠水位計データから流入量を算定する手法を紹介する。流入量は管内貯留量を用いて以下式で算出することができる（図2-4参照）。

$$\text{流入量} P(t) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \\ = \{ \text{管内貯留量} S(t) - \text{管内貯留量} S(t - \Delta t) \} / \Delta t + \text{揚水量} L(t) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

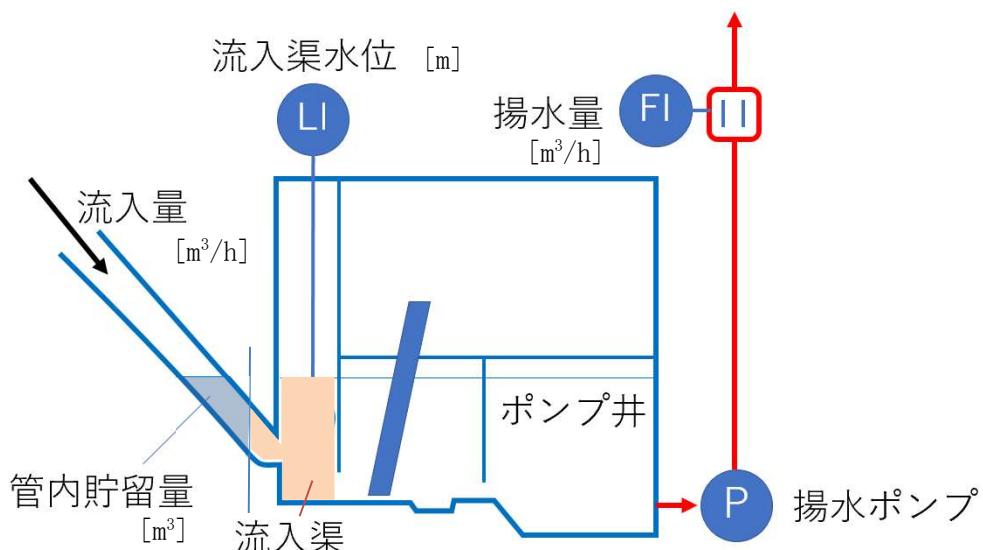


図2-4 流入量算定のための水系図

ここで、管内貯留量は、流入渠水位から算定することができる。実証にて使用した管内貯留量算出表を表2.1に示す。

表 2.1 管内貯留量算出表

流入渠水位 (m)	貯留量計(m ³)	流入渠水位 (m)	貯留量計(m ³)
16	17099.3	7.5	12468.4
15.5	17087.7	7	11537.5
15	17076	6.5	10087.7
14.5	17064.4	6	8249
14	17052.7	5.5	6567
13.5	17041.1	5	5507
13	17029.4	4.5	5052.4
12.5	17017.8	4	4972.5
12	16992.4	3.5	4811.4
11.5	16832.2	3	4236.9
11	16542.8	2.5	3228.8
10.5	16209.9	2	1955.6
10	15860.2	1.5	992.4
9	14592.3	1	418.3
8.5	13789.3	0.5	102.8
8	13074.4		

このようにして得られた流入量データを用いて流入量予測を実施する。流入量予測はタイムエリア法に基づき予測する。タイムエリア法の概念図を図2-5に示す。

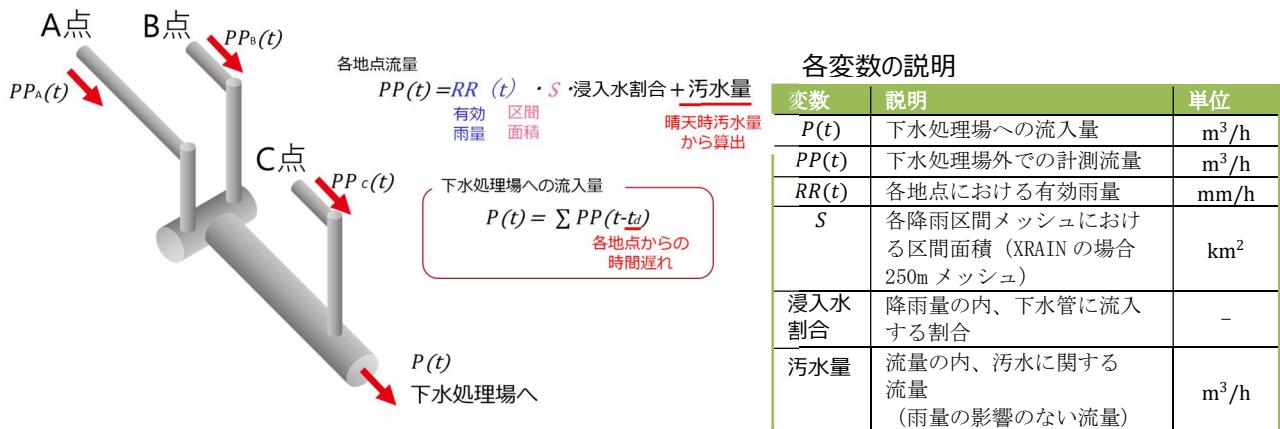


図2-5 タイムエリア法の概念図

タイムエリア法は各地点における流量 $PP(t)$ を以下の式(1)で算出する。

$$PP(t) = RR(t) \cdot S \cdot \text{浸入水割合} + \text{汚水量} \quad (1)$$

ここで $RR(t)$ は有効雨量、 S は区間面積であり、XRAINから取得される雨量データ、並びにメッシュ数により決定される。また、下水処理場への流入量 $P(t)$ は以下の式(2)で算出される。

$$P(t) = \sum PP(t - t_d) \quad (2)$$

ここで t_d は各地点から下水処理場への流出時間（時間遅れ）である。本手法を用いて流入量を予測する。

ただし、今回適用する降雨情報回線（XRAIN）は現在時刻までの降雨量までしか配信していないため、降雨回線にXRAINを適用する場合は本手法のみでは予測流入量を表示することはできない（※予測降雨量が配信されている配信サービスを適用した場合、本手法のみで予測可能）。参考までに現在降雨がどの程度の時間遅れで流入量に影響を与えるかを考察する。

今回の実証では、流域雨量データと処理場内への雨水流入量データ（＝雨天時ににおける実績流入量－晴天時汚水量）との時間移動相関係数により、算定した。

したがって現在降雨に関しては平均70分程度で処理場内に到達していると推察される。70分以降の予測に関しては別モデルで補完する必要がある。今回のシステムでは最大3日分先の予測値を出力できるように構築したが、70分以降の予測値は以下手法にて補完している（図2-6）。

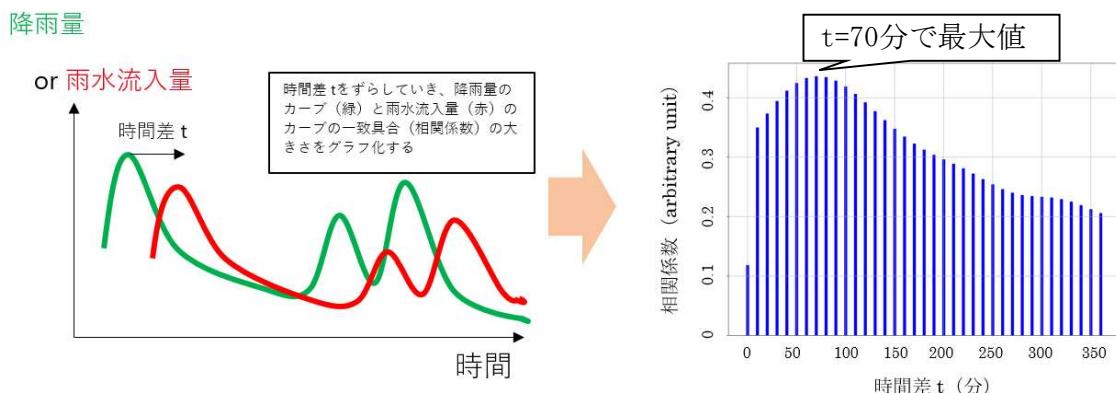


図2-6 降雨量と雨水流入量のカーブ（左図、イメージ図）と
時間差 t に対する相関係数（右図）

【補足】過去の降雨実績に基づいた流入量フィッティング

第3章第2節0に示す技術を1年分のトレンドデータに関して分類したところ、

図2-7の散布図が得られた。

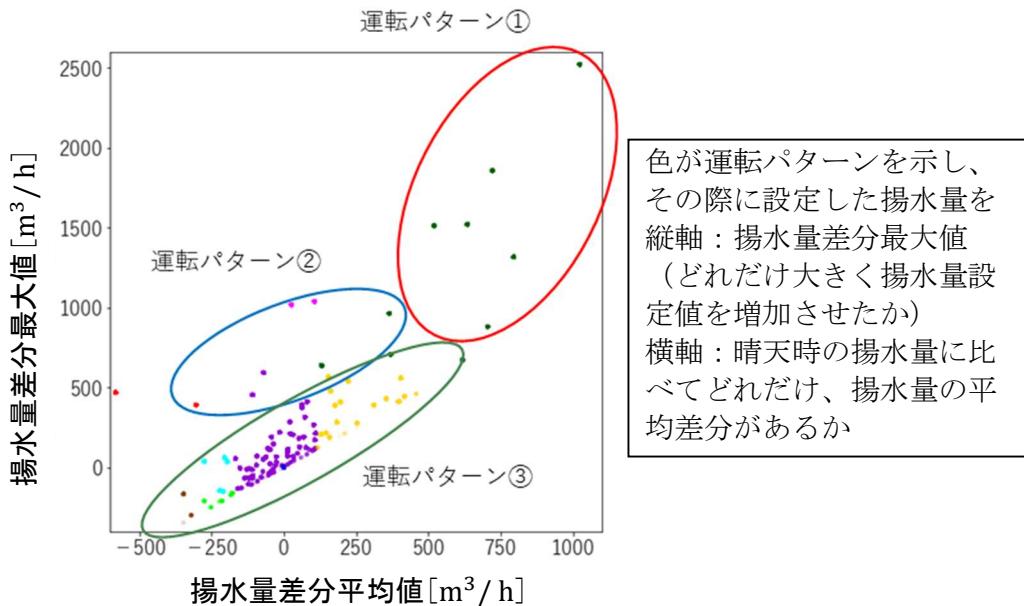


図2-7 揚水量設定値の散布図
(各点は運転パターン分類技術で分類した内容で着色している)

図2-7を分類すると大きく3パターンに分類することが確認できている。

運転パターン①

瞬間差分の最大値、揚水量差分平均値がともに大きい場合：

強い雨が長期間続くパターン「長期降雨 (12mm/h程度)」

運転パターン②

瞬間差分が大きいが、揚水量差分平均値は差が小さい場合：

短時間で強い雨が発生したパターン「短期降雨 (20mm/h程度)」

運転パターン③

瞬間差分、揚水量差分平均値ともに小さい場合：

弱い雨で通常通りの運用をしたパターン「短期降雨 (10mm/h程度)」

(降雨量の具体的な値は、過去実績値雨量から目安として設定した)

※揚水量差分平均値…実際の揚水量と晴天時平均揚水量との差分を降雨期間で平均化した値

よって上記3パターンを実現する降雨を3つ作成「長期降雨 (12mm/h程度)」「短期降雨 (20mm/h程度)」「短期降雨 (10mm/h程度)」し、将来降雨の影響に關

してはそれらを選択できるように実装している（図2-8）。

（例：今後、短期で高強度の降雨が想定される場合、「短期降雨（20mm/h程度）」を選択。）

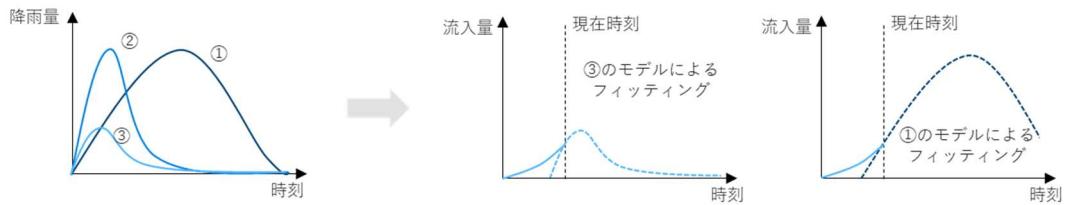


図2-8 作成した3つの降雨パターン（左図）と
それらを選択した場合における流入量予測値のフィッティング方法（右図）

② 流入渠水位予測機能

流入渠水位に関しては①の結果を用いて算出する。

管内貯留量 $S(t) =$

$$\text{管内貯留量} S(t - \Delta t) + \{ \text{流入量} P(t) - \text{揚水量} L(t) \} \times \Delta t [m^3]$$

ここで、流入量は前述の流入量予測機能、揚水量は後述の多目的最適化の結果、導かれる揚水量の値より決定される。得られた管内貯留量は表2.1に示す換算表を用いて流入渠水位に換算することが可能となる。

③ 水質予測機能

水質予測に関しては活性汚泥モデル（ASM、詳細はp. 55参照）を用いて下水処理場から放流される放流水質を予測している（図2-9参照）。活性汚泥モデルでは各物質の収支計算から反応槽での水質変動を計算し、下水処理場から放流される放流水質を予測する。

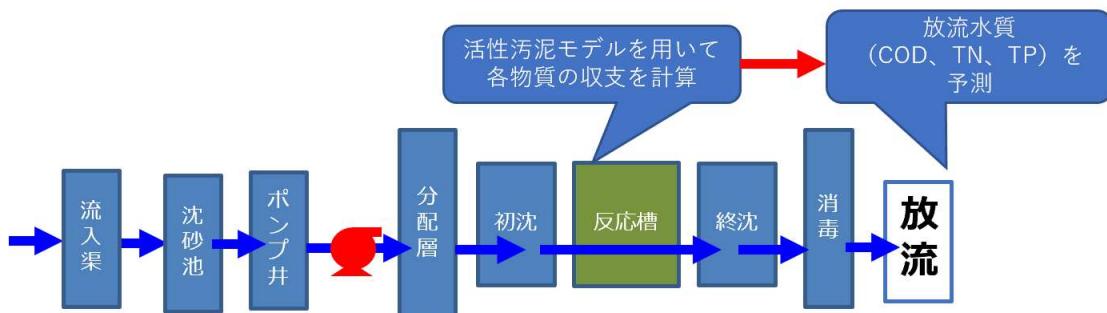


図2-9 ASMを用いて放流水質予測を実施する流れ

④ 汚泥界面予測機能

最終沈殿池は下水処理場内における設備の一つで、生物反応槽の後段に設置され污水内から活性汚泥を除去する役割を持つ。重力沈降の働きにより下部に汚泥が沈降するが、汚泥界面高さは揚水量を上昇させると増加する傾向にある。汚泥界面高さは上昇しすぎると「汚泥流出」といった事故につながるため、汚泥界面高さは適切に保つ運転が必要となる（図2-10参照）。よって揚水量を変動させた際にどのような汚泥界面高さになるか、リアルタイムに予測する。技術詳細はp. 63に記載する。

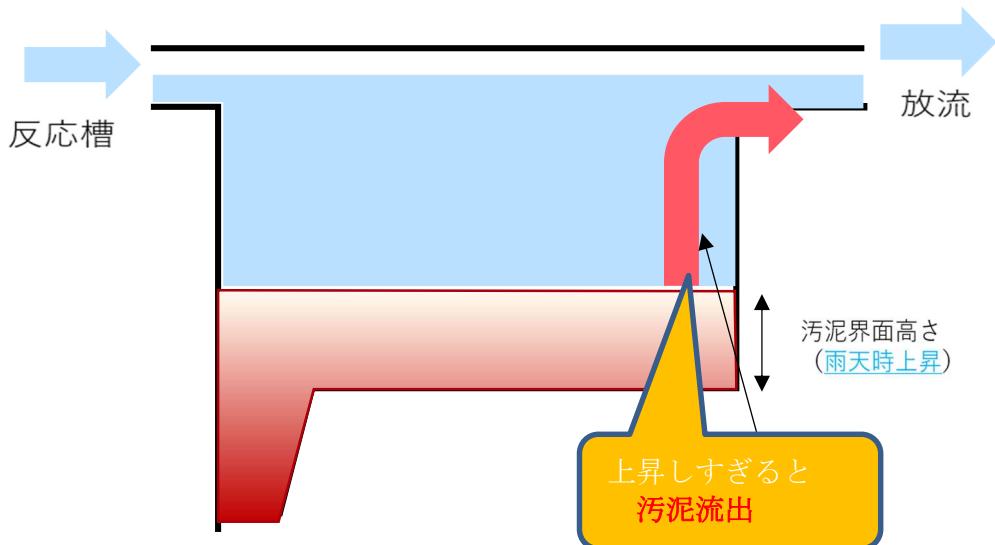


図2-10 最終沈殿池の構造

⑤ 揚水ポンプ運転ガイダンス

「水位」「コスト」「水質」といった雨天時に考慮すべき事項をバランス良く実現するため、AI技術である多目的最適化を適用し、最適な揚水ポンプの運転操作をガイダンスする。多目的最適化とは下水処理場の雨天時運転のように多数の目的（「水位を低くしたい」「水質を低くしたい」「使用電力を抑えたい」）がある場合に、全体目的関数が最も小さくなるような解（パレート解）を探索する手法で、今回は探索解として揚水量を探索する（図2-11）。

多目的最適化では考慮すべき事項を目的関数化（水位 f_1 、電力 f_2 、水質 f_3 ）し、全体目的関数 $F(X) = \alpha f_1 + \beta f_2 + \gamma f_3 + \dots$ を定める。ここで α, β, γ は重みづけ係数であり、操作員が重要視する目的関数に応じて重みづけを変更させる（例：水位を重視する運転ガイダンスであれば、係数 α を大きくする。）。

水位重視運転モード：目的関数 f_1 を重視（ α を大きくする）

コスト重視運転モード：目的関数 f_2 を重視（ β を大きくする）

水質重視運転モード：目的関数 f_3 を重視（ γ を大きくする）

また、処理場においては「管理水位基準値」や「総量規制値」「契約電力量」等もあるため、それら制約に関しては制約関数（水位、総量規制）を定め、それら規制値を超過する揚水量に関しては、罰則（全体目的関数に罰則値を加算する）を設けている。今回、全体目的関数 $F(X)$ を最小とする解を「主ポンプの揚水量」とし、これを運転ガイダンス値として採用する。

ガイダンス値の算出方法 「多目的最適化」

- 雨天時運転操作（揚水量）において考慮すべき事項

目的関数： f_1

浸水しないように…

目的関数： f_3

放流水質も守らないと…

目的関数： f_2

契約電力超過しないよう電力も抑えて…

「多目的最適化」 目的関数を最小化する解（揚水量）を探索・学習し、発見する手法

$$F(X) = \alpha f_1 + \beta f_2 + \gamma f_3 + \dots \quad (\alpha, \beta, \gamma, \dots \text{の重みづけにより「水質重視」「水位重視」} \dots)$$

目的関数

$$f_1 = \max\left(\left(\frac{y_1 - 2}{y_1 - 2.3}\right)^2\right) \quad \text{水位は低くしたい}$$

$$f_2 = \max(y_2 [kW]) \quad \text{電力は低くしたい}$$

$$f_3 = \max\left(\frac{COP(t)}{20[mg/L]} \cdot \frac{TPE(t)}{16.5[mg/L]} - \frac{TPE(t)}{1[mg/L]} + Q_{Treat}\right) \quad \text{水質（総星値）は低くしたい}$$

$$g_4 = Demand(u(t)) < 1990 \quad \text{契約電力値 (1990kW) を超過しないように}$$

$$g_5 = Q_{Total} < 0.8 \quad \text{総量規制値の80%以下になるように}$$



※具体的な数値は衣浦西部浄化センター用に設定

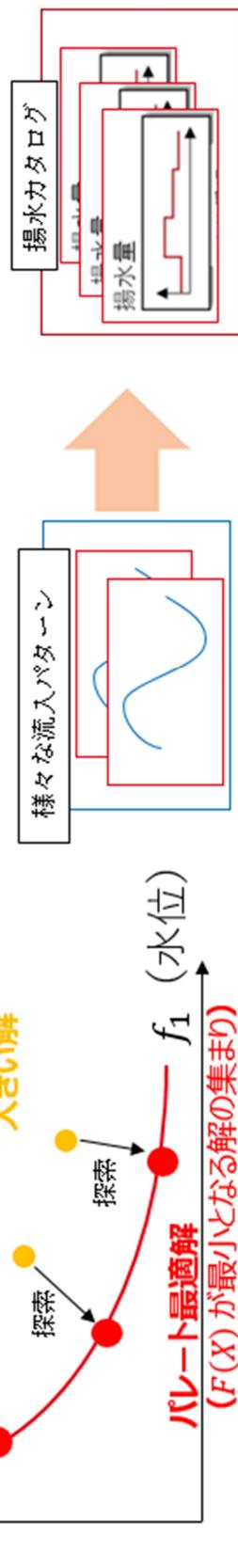


図2-11 多目的最適化の概要

革新的技術の特徴

本技術の特徴を以下に簡潔に記載する。

① 物理モデルの活用

機械学習等の手法では「大量の元データ」を基に学習・予測を実施しているが、雨天時のような非定常状態のデータ数は少なく、十分な精度や傾向が得られない場合がある。非定常時にも予測できるように、本実証研究ではASM（活性汚泥モデル）やタイムエリア法等、物理モデルを随所に取り入れている。

② 事前のデータ分析によるオンライン計算負荷の低減

刻一刻と変化する下水処理場の運転操作は分単位での運転操作が求められる。昨今の計算機性能の進化により計算速度は上昇しているものの、分単位での最適化計算・予測計算は今なお困難な状況である。本研究では、事前の机上計算により最適化計算・予測計算に必要なパラメータ等を分析することにより、実機での計算負荷を低減させていく。

§ 7. 本技術を用いた運転操作の改善

本技術により、熟練の操作員が経験や勘に基づき実施していた下水処理場における雨天時運転操作を、経験の浅い操作員でも実施できるようになる。

【解説】

本技術による運転操作の改善イメージを図2-12に示す。本技術を用いることにより、熟練の操作員が経験や勘に基づき実施していた下水処理場における雨天時運転操作を、AI等を用いた予測技術により実施可能となる。(具体的な費用対効果は資料編3に記載している)

本技術を活用した運転操作の改善イメージ

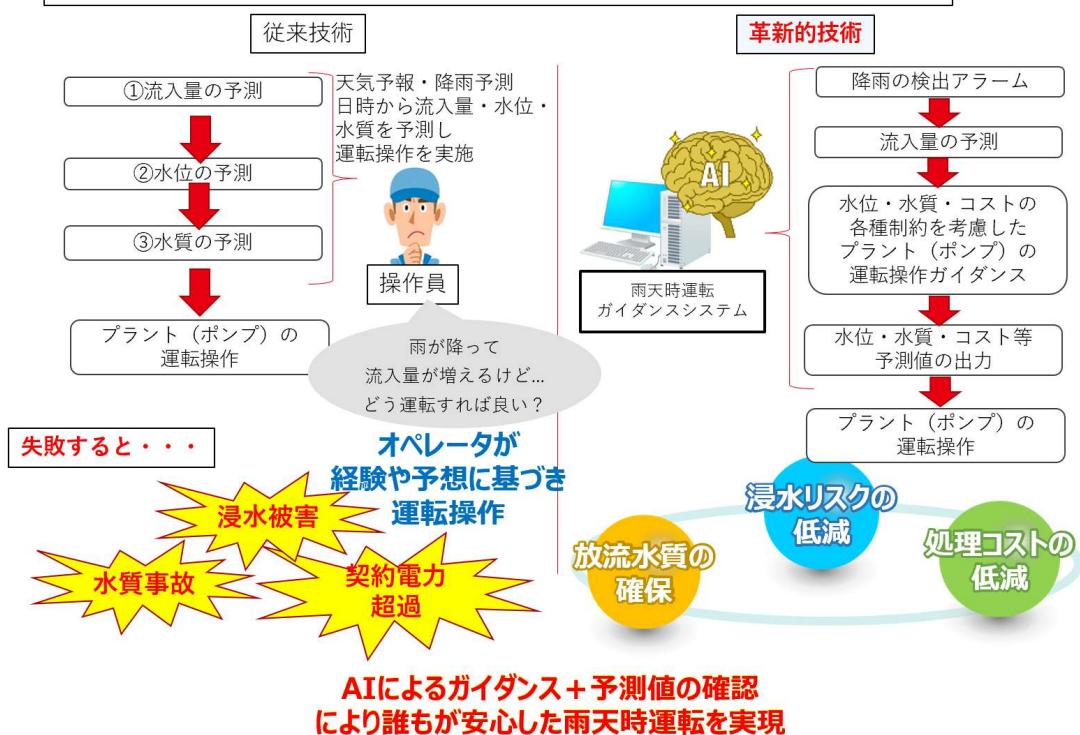


図2-12 雨天時運転ガイダンスシステムによる運転操作の改善イメージ

現状の雨天時運転操作

現状は天気予報・降雨情報・日時から熟練の操作員が処理場内に流入する流入量を予測し、それに伴う水位・水質の変動を経験則により予測する。ただし、これらは経験や予測に頼った運転操作であり、操作を誤ると「浸水被害」「水質事故」「契約電力超過」といった重大事故につながる恐れがある。

革新的技術：雨天時運転ガイダンスシステムを活用した運転操作

雨天時運転ガイダンスシステムはまず、XRAINによる降雨データから処理場内に

流入する流量を予測する（降雨開始時にはアラームを鳴動させる）。それに伴い、水位・水質の変動をとらえ、それらに対応した揚水量をガイダンスする。またガイダンスした揚水量に対しては、運転ガイダンスに従った場合の水位・水質・コスト（電力）の予測値を出力することにより、運転ガイダンス値の正当性を確認することができ、経験の浅い操作員でも安心して運転操作を実現している。

第2節 システム構成の検討

§ 8. システム構成の検討

本技術は、各種計測データを活用したシステムであり、データ取得のためのシステム構成を事前に検討する必要がある。

【解説】

本節ではデータの取得に必要なシステム構成を解説する。

雨天時運転ガイダンスシステムのデータ取得構成を図2-13に示す。

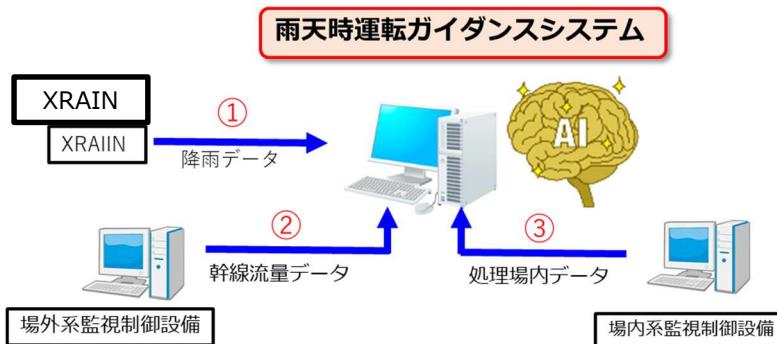


図2-13 雨天時運転ガイダンスシステムのシステム構成図と提供機能

① 降雨情報配信システムからのデータ取得構成

XRAINデータは、国土交通省から水防災オープンデータ提供サービスを通じてリアルタイムに提供されている。その配信仕様を表2.2に示す。XRAINはメッシュサイズが細かく情報配信間隔が短いため、下水処理場への流入量予測を精度よく検証するために適したサービスと考えられる。

表 2.2 XRAIN の配信仕様（□部は実証事業で採用した方式、
河川情報センター「事業概要パンフレット」より作成

https://www.river.or.jp/koeki/opendata/data/01_suuchi_pamphlet_v20220510_2.pdf

仕様項目	XRAIN 仕様
解析に用いるデータ	国土交通省 X バンド MP レーダ 国土交通省 C バンド MP レーダ
メッシュサイズ	250m 間隔
降雨予測機能	なし
情報配信間隔	1 分
配信方式	リアルタイム方式（専用線・閉域網） / 準リアルタイム方式（インターネット） / 蓄積一括方式

XRAINからのデータ取得に関しては、処理区域をカバーする範囲の降雨メッシュの選択、ならびに配信方式を選定する必要がある。配信方式で専用線・閉域網を選択した場

合、河川情報センターでは広域ネットワークサービスを提供していないため、XRAINデータ提供装置から現地処理場までの通信回線（広域ネットワーク）を別途構築する必要がある（図2-14）。

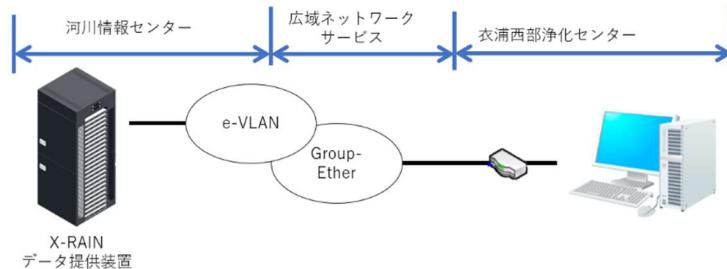


図2-14 降雨情報配信システムのネットワーク構成図

（河川情報センターの所掌範囲はe-VLANまでとなっており、浄化センターまでネットワークを構築するためには広域ネットワークサービスを別途契約する必要がある。

「水防災オープンデータ提供サービス 利用の手引き」より作成

https://www.river.or.jp/koeki/opendata/data/02_suuchi_tebiki_1.8.pdf

またXRAINからの配信雨量データはTCP/IP通信にて1分間隔で配信されている。データ仕様に関しては「XRAINデータフォーマット仕様書 5」にて規定されているため、その仕様に準じて降雨データを取得する。

②、③場内系監視制御設備、場外系監視制御設備からのデータ取得構成

処理場内・処理場外からの監視制御データは既存の監視制御装置のデータを活用するために、各処理場の既存設備に適した形でデータを取得することが望まれる。製造が異なるメーカ同士のデータ授受に関しては共通的なネットワークプロトコルが必要となる。参考として、今回利用した通信仕様を表2.3に示す。

表 2.3 今回利用した通信方式の概要

通信仕様	内容
データ伝送速度	10Mbps
通信モード	10BASE-T：半二重
最大セグメント長	100m
IPバージョン	IPv4
利用通信方式	MELSECコミュニケーションプロトコル

第3節 技術の適用条件

§ 9. 技術の適用条件

本技術を適用するためには必要となるデータが存在する。過去データ、必要計器に対する必要条件、推奨条件に関して要素技術毎にまとめる。

【解説】

本システムはデータを基にしたシステムであり、各要素技術に関して、適用条件が異なる。適用条件を要素技術毎に表2.4に記載し、以下各項目を解説する。

表 2.4 条件整理表

要素技術 条件レベル	必要条件	推奨条件
	要素技術	条件レベル
流入量予測技術	・下水処理場内流入側に水位計（流量計）がある	・下水処理場外に流量計がある ・計画処理区域図が整備されている
水質予測技術	・水質に関する以下データを計測している（反応槽MLSS、DO、揚水量、水温、曝気風量、放流の全窒素・全リン・COD）	・0に記載のデータを計測している ・処理方式による注意点は資料編に記載
汚泥界面予測技術	・汚泥界面を計測している	・手分析等でSVIを計測している
運転パターン分類技術・多目的最適化技術	・中央監視制御装置に1分間隔の監視制御データが蓄積されている ・主ポンプが手動にて運用されている	・危険管理水位、非常時警戒態勢水位等の運転管理基準値が存在する。

※全データは1分間隔で概ね4か月以上のデータが必要
(放流水質データに関しては1時間間隔)

流入量予測技術**必要条件**

下水処理場への流入量を予測する技術であり、流入量の過去データが必要である。流量計の設置が望ましいが、一般に処理場への流入量は計測していないことが多い。その場合、流入池に設置された水位計での代替も可能である。ただし、水位計での代替の場合、流量へ変換する必要があるため、水位毎の管内貯留量算出表が必要となる。

推奨条件

下水処理場外に流量計がある場合、精度向上の観点からそのデータも活用することが好ましい。また、処理区域外の雨水の流入量への影響は無視する。

水質予測技術

必要条件

反応槽での水質変動を予測する技術であり、反応槽内の各種データ（揚水量、返送汚泥量、硝化液循環量、余剰汚泥量、DO、MLSS、曝気量）、ならびに放流水質（COD、TN、TP）の計測データが必要である。また、収集した計測データと同期間ににおける、日常試験等で計測した最初沈殿池越流水の水質（COD、TN、TP）データが必要である。

推奨条件

その他計測機器が反応槽内に設置されている場合、それらのデータも追加参照することが望まれる。反応槽内の計器は千差万別であるが、それらの計器に関して重要度合いを加味して整理した表を表2.5に示す。本実証ではA20法の水処理系列に本技術を適用したが、本技術はその他処理方式にも適用可能である。その他処理方式に適用する際の注意点は資料編7に記載する。

表2.5（水質予測における）各種水質計器の重要度

計測データ	水質予測における各種水質計器の重要度		
	大	中	小
曝気風量	○		
気温	○		
雨量	○		
初沈汚泥引抜濃度		○	
初沈汚泥引抜流量		○	
余剰汚泥流量			○
返送汚泥濃度		○	
返送汚泥流量	○		
反応槽出口DO	○		
反応槽出口MLSS	○		
初沈流入pH	○		
放流pH	○		

汚泥界面予測技術

必要条件

汚泥界面計のデータが必要である。

推奨条件

汚泥の沈降性を示すSVIを手計測している場合、必要なパラメータとして活用できる。（汚泥界面の実測データよりSVIを推定することもできるので、推奨条件とする）

運転パターン分類技術・多目的最適化技術

必要条件

中央監視制御装置に1分周期の監視制御データが蓄積されている。また、主ポンプが手動にて運用されている。

推奨条件

危機管理水位、非常時警戒態勢水位等の運転管理基準値が存在する場合、多目的最適化における目的関数や、運転パターン分類の参考となることから推奨条件とする。

その他（データ期間に関して）

本実証にて、4か月分の分データを活用することにより、各種パラメータを推定することができたため、**必要データ期間の目安を「4か月以上」と定める。**その根拠を以下に示す。

我が国における降雨日数の中央値は109日であり、およそ30%の期間が降雨日であるため（表2.6参照）、本データ期間で推奨できるものと考える。また、浸入水割合（降雨総量のうち下水管に流入する割合）の季節変動（図2-16）を見ても、どの4か月間のデータにおいても有意な差が見られないため、必要データ期間は4か月と定めた。

ただし、降雪地域に関しては融雪水による影響が考えられるため、夏季データを利用するものとする。降雪時期は融雪影響が大きく、本技術の対象期間とはみなさない。

表 2.6 各地域における降雨日数（2020 年）
 （総務省統計局の「統計ダッシュボード（<https://dashboard.e-stat.go.jp/>）」
 のデータを加工して作成、実証場所の愛知県には黒枠している）

地域	降水日数	地域	降水日数	地域	降水日数	地域	降水日数
北海道	151	東京都	108	滋賀県	135	香川県	87
青森県	159	神奈川県	108	京都府	112	愛媛県	95
岩手県	131	新潟県	182	大阪府	102	高知県	115
宮城県	99	富山県	186	兵庫県	98	福岡県	107
秋田県	192	石川県	194	奈良県	105	佐賀県	108
山形県	127	福井県	181	和歌山県	106	長崎県	118
福島県	108	山梨県	89	鳥取県	156	熊本県	106
茨城県	122	長野県	106	島根県	137	大分県	105
栃木県	105	岐阜県	110	岡山県	85	宮崎県	120
群馬県	96	静岡県	108	広島県	99	鹿児島県	127
埼玉県	101	愛知県	112	山口県	112	沖縄県	129
千葉県	115	三重県	109	徳島県	92		
降水日数平均値						120 日	
降雨日数中央値						109 日	

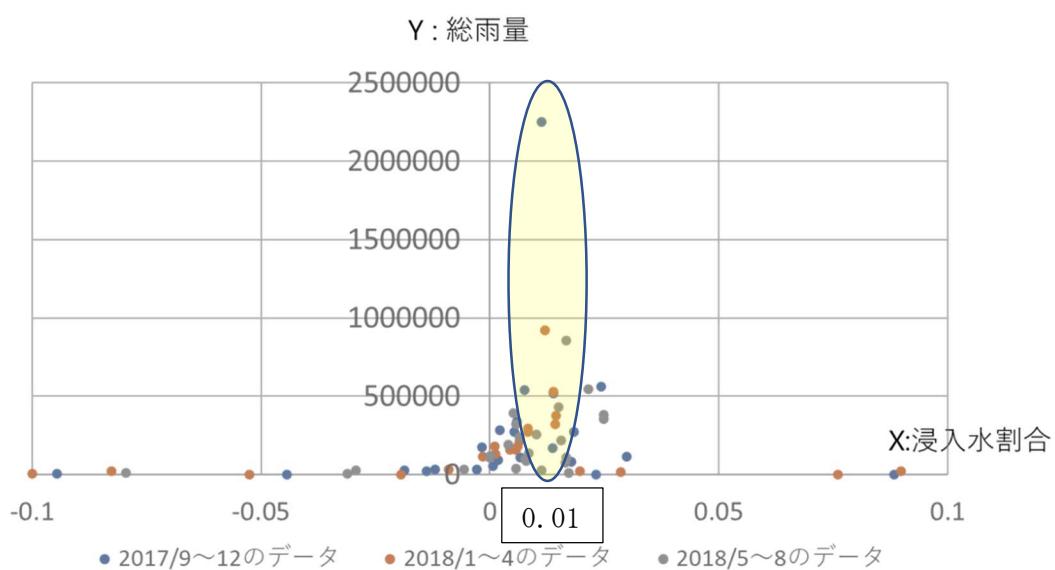


図2-16 浸入水割合の散布図
 （どのデータ期間【色で分類】においても、対象点が浸入水割合：0.01付近に集中していることが分かる）

また、今回構築する雨天時運転ガイダンス装置のデータ演算フローを図2-15に記載する。以下で本ガイダンスシステムの演算フローを解説する。

処理1：雨量情報取得

レーダ降雨データ(XRAIN)から処理場に到達する流入量を予測する。浸入水割合や時間遅れ等の雨天時浸入水に関するパラメータに関しては事前分析にて推定している値を用いる。

処理2：揚水ポンプ運転パターン作成

得られた流入量予測値や水位・水質の現在値などから処理場状態パターンを抽出し、対応する運転ガイダンス値(揚水量)を提示する。処理場状態パターンは事前分析にて運転パターン分類技術【詳細は第3章第2節0参照】を用いて分類し、運転ガイダンス値に関しては分類されたパターン毎に、事前に多目的最適化計算を実施した「揚水カタログ」を作成している。現地では抽出された運転パターンに対する揚水カタログを抽出するのみで、運転ガイダンス値が出力されており、実機での最適化計算を省力化し、リアルタイム性能を確保している。

また、本実証では各操作員の志向が異なることを考慮し、「水位重視」「水質重視」「コスト(電力量)重視」の3つの運転ガイダンスマードを設けている。

処理3：予測値出力

得られた揚水量から、ガイダンス値通りに運転した場合における各種予測値を出力する。揚水量ガイダンス値のみの提示だけではなく、ガイダンス値に従った場合の水位・水質・電力・汚泥界面予測値もあわせて出力することで、操作員がガイダンス値の正当性を判断しやすく、経験の浅い操作員でも安心して運転できる状況を作っている。

- ・水位や電力値⇒揚水量に応じた水位、電力値を出力。
- ・汚泥界面予測⇒p. 61で示すVesilind沈殿モデルにより汚泥界面高さを予測。
- ・水質予測⇒p. 55で示す活性汚泥モデル(ASM2d)を用いるものの、実機で計算するためには計算負荷が高い。そのため、あらかじめ過去の計測データから揚水量に応じた水質予測テーブルをASM2dにより事前に作成し、揚水量に応じた水質予測テーブルを呼び出すことで、実機での計算負荷を低減させている。

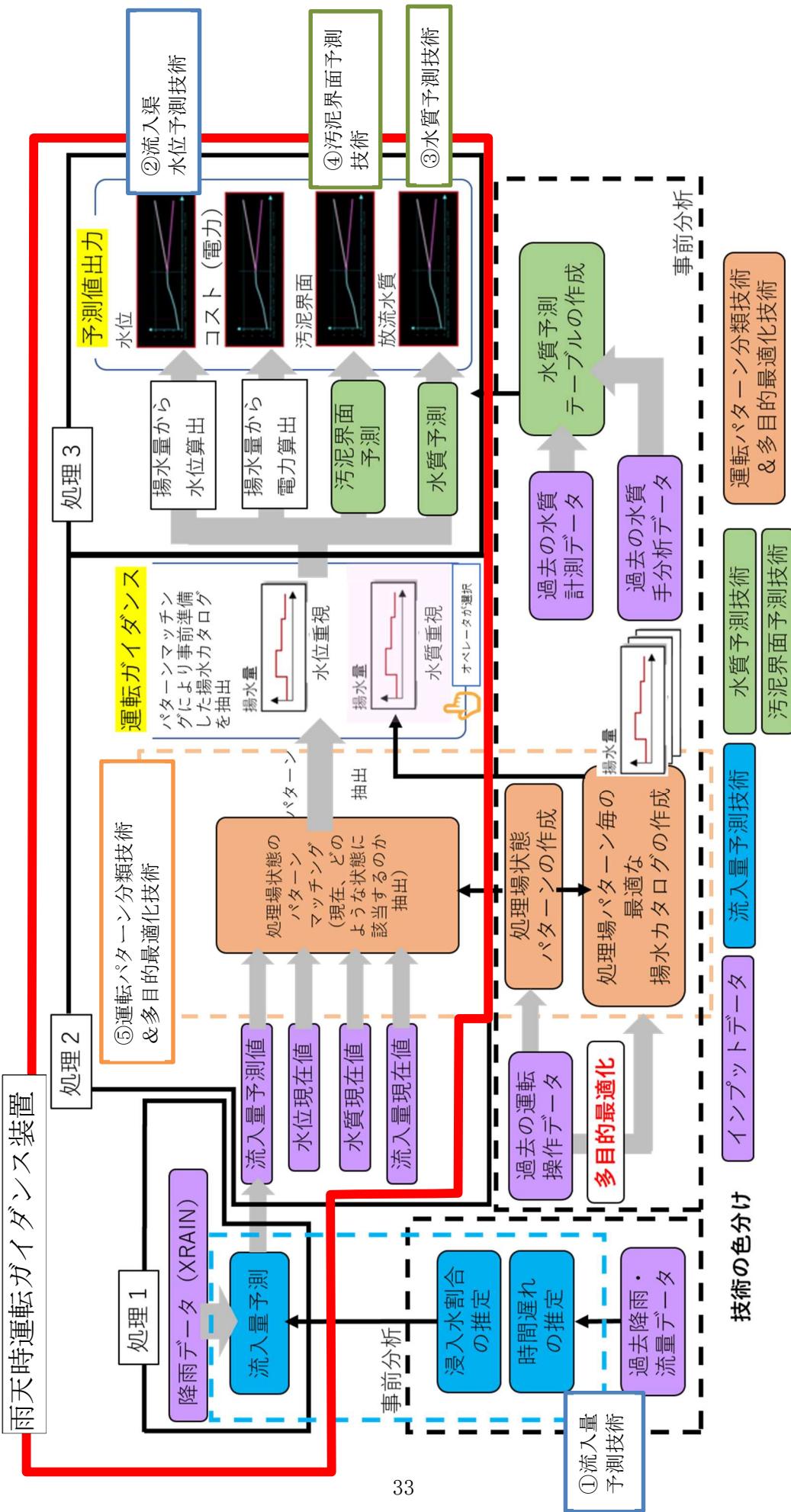


図2-15 雨天時運転ガイダンスシステムの概略演算フロー

第4節 技術の評価

§ 10. 流入量予測技術の評価

下水処理場への流入量をタイムエリア法により予測したため、その実証結果、ならびに評価結果を示す。流入量予測技術はNS係数、ならびに失報率により技術評価を実施しており、NS係数 = 0.912（良好な流入量予測カーブが得られた）、失報率6.3%（流入量が基準流量を超える場合を正しく予測できている）を得られている。

【解説】

流入量予測はp. 14に示すタイムエリア法により予測し、その評価にはNash-Sutcliffe係数（NS係数）を用いる。NS係数は、1970年に（Nash and Sutcliffe, 1970）により提唱された指標である。本指標は流入量の立ち上がりに着目した指標であり、値が1に近いほどモデルの精度はよいとされ、0.7以上で有用とされている。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{ q_0(i) - q_c(i) \}^2}{\sum_{i=1}^N \{ q_0(i) - q_{av} \}^2} \quad (1)$$

$$q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_0(i)$$

N: 計算時間数、 $q_0(i)$: i 時の実測流量、 $q_c(i)$: i 時の計算流量

判定基準

$$NS \geq 0.7 \Rightarrow \text{良}, 0.7 > NS \geq 0 \Rightarrow \text{やや不適}, NS < 0 \Rightarrow \text{不適}$$

(1)式の右辺、分子部に着目すると、2乗平均誤差の形をとっている。よって完璧な予測をした場合、NSは1に近づく。一方で、実測値と予測値の差が、実測値と流量平均程度の差である場合 ($|q_0(i) - q_c(i)| = |q_0(i) - q_{av}|$)、分母・分子が一致し、NSは0となる。実測値と予測値の差が、実測値と流量平均程度の差以上 ($|q_0(i) - q_c(i)| > |q_0(i) - q_{av}|$) となると本指標はマイナスとなる。

本実証では、降雨期間におけるNS係数の平均値で予測精度を評価した。降雨期間は流域全体で3mm/hの降雨がある場合かつ、100分以内の断続間隔であれば1降雨期間とし、12時間是最小降雨期間と定義した。

また、NS係数のみでは、直感的な理解が難しいため、流入量予測に関しては「失報率」による評価も実施した。「失報率」とは実績値が基準流量を超過した場合に、予測値が基準流量を超過したことを検知できなかった割合を示す。本実証では失報率10%以下を目標値として評価を実施した。

実証により得られた流入量と流入量予測の参考事例を図2-17に示す。

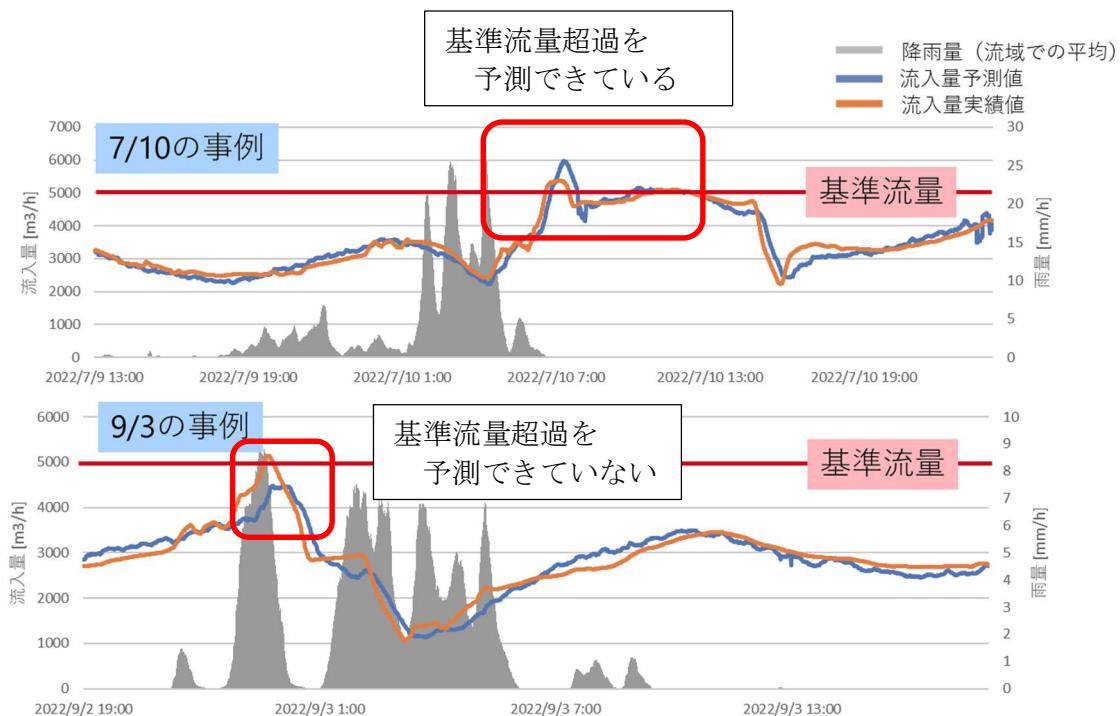


図2-17 流入量予測の参考事例

実証の結果、NS係数、失報率に関しては、技術目標を達成した。

NS係数 : 0.912 (> 0.7)

失報率 : 6.3% ($\leq 10\%$)

§ 11. 水質予測技術の評価

放流水質は活性汚泥モデルを用いて予測したため、その実証結果、並びに評価結果を示す。水質予測技術は平均絶対誤差率、並びに濃度絶対値により評価を実施した。平均絶対誤差率はCODで11.3%、TNで13.4%、TPで34.5%となり、TPのみ誤差率が大きくなつたものの水質事故を発生させるような誤差までには至っていない。

【解説】

水質予測技術に関しては、活性汚泥モデル（ASM）を用いて放流水質を予測した。その許容誤差に関しては実証フィールドにおける「水質ワーストケース（2020年度における汚濁物濃度の最大値）」から許容誤差・許容濃度差を算出した。

平均汚濁物濃度に対する許容誤差③に関しては以下式で算出している。

$$\text{③ 許容誤差} = \frac{| \text{②水質汚濁防止法第4条の5 第1項} - \text{①最大汚濁物濃度} |}{\text{①最大汚濁物濃度}}$$

上記式で算出される許容誤差③に関しては、実際の水質濃度に対して、許容誤差分だけ下回る水質予測値を予測し続けた場合、「実際には水質総量規制値を上回る危険性があるにもかかわらず、予測値は水質総量規制値を超過しない」ことを示す。よってこの許容誤差を下回る水質予測精度（本実証では目標値を30%と定めた）が出るかどうかを検証した。

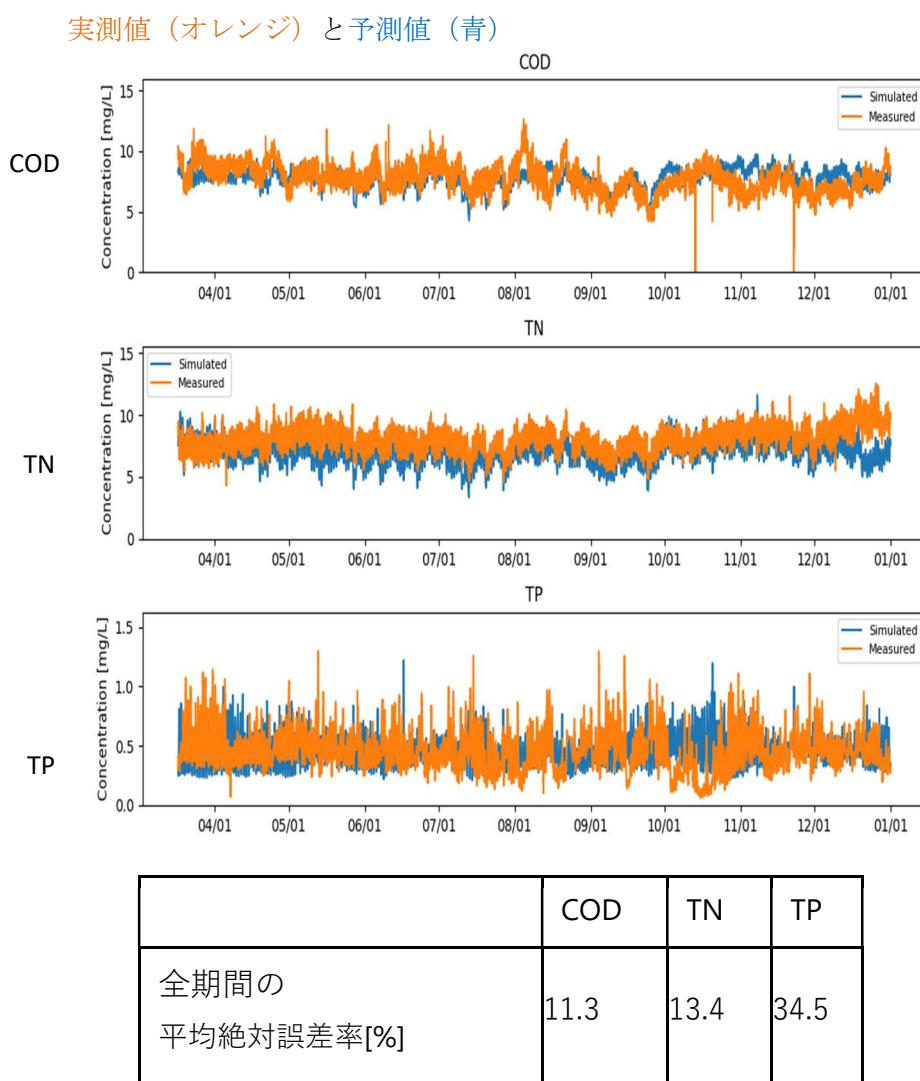
表 2.7 許容誤差の計算例

	日付	①最大汚濁物濃度 [mg/L]	②水質汚濁防止法第 4条の5第1項 [mg/L]	③平均汚濁物濃度 の許容誤差 ^{※1} [%]	④平均汚濁物濃度 の許容誤差 [mg/L]
COD	2019/9/10	11.7	20	70.9	8.30
全窒素	2019/1/3	12.0	20	66.6	7.99
全りん	2019/8/28	1.13	1.5	32.7	0.37

※1 ③平均汚濁物濃度の許容誤差 (%) = | ②水質汚濁防止法第4条の5 第1項 – ①最大汚濁物濃度 | / ①最大汚濁物濃度 * 100

④平均汚濁物濃度の許容誤差[mg/L] = ①最大汚濁物濃度 × ③平均汚濁物濃度の許容誤差 (%)

実証結果を図2-18に示す。予測値に関しては、今回モデルの妥当性を評価するため、同時刻における予測値と実績値とを比較した。誤差率で評価すると、COD・TNに関しては高い一致度が得られたものの、TPに関しては目標精度に一步届いていない。TP精度が低い理由としては濃度絶対値が小さく、些少の濃度誤差により、誤差率に大きな変動を与えることが原因と考えられる。よってTPに関して日平均をとった場合の予測値と実測値の比較を図2-19に示す。絶対値による許容誤差を考慮すると予測値は許容誤差内に収まっており、概ね良好な結果が得られていると考えられる。



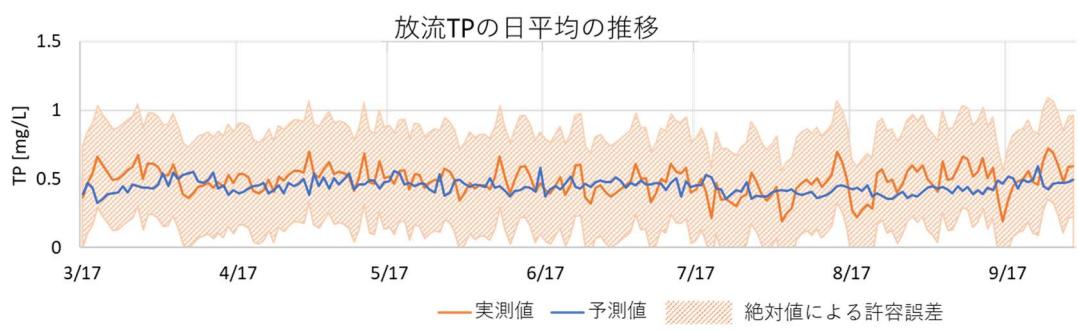


図2-19 放流TPの日平均の推移（実測値と予測値）

（許容誤差はハッチング表示している）

§ 12. 汚泥界面予測技術の評価

汚泥界面はVesilindモデルを用いて予測したため、その実証結果、並びに評価結果を示す。汚泥界面予測技術は失報率（汚泥界面基準値を実測値で超過した回数の内、予測値が基準値超過を予測できなかった割合）により評価を実施した。実証期間中、汚泥界面が基準値を超過した回数は6回あったが、予測値は6回ともに基準値を超過したことを見出している。

【解説】

汚泥界面予測値はVesilindモデルを用いて予測している。以下に本モデルでの評価手法を記載する。

最終沈殿池における汚泥界面値は上昇しすぎると、汚泥流出といった事故につながる可能性があるため、汚泥界面予測技術は「汚泥界面が上昇することを確実に予測すること」が求められる。よって流入量予測技術と同様に本技術に関しても「失報率」にて評価する。本技術における失報率は「汚泥界面が規定値を超えた事例のうち、予測値が汚泥界面規定値を超過しなかった割合」と定義し、10%以内を目標値と定めた。

実証により得られた結果を図2-20に示す。実証期間中、失報率は0%であり、良好な結果が得られている。

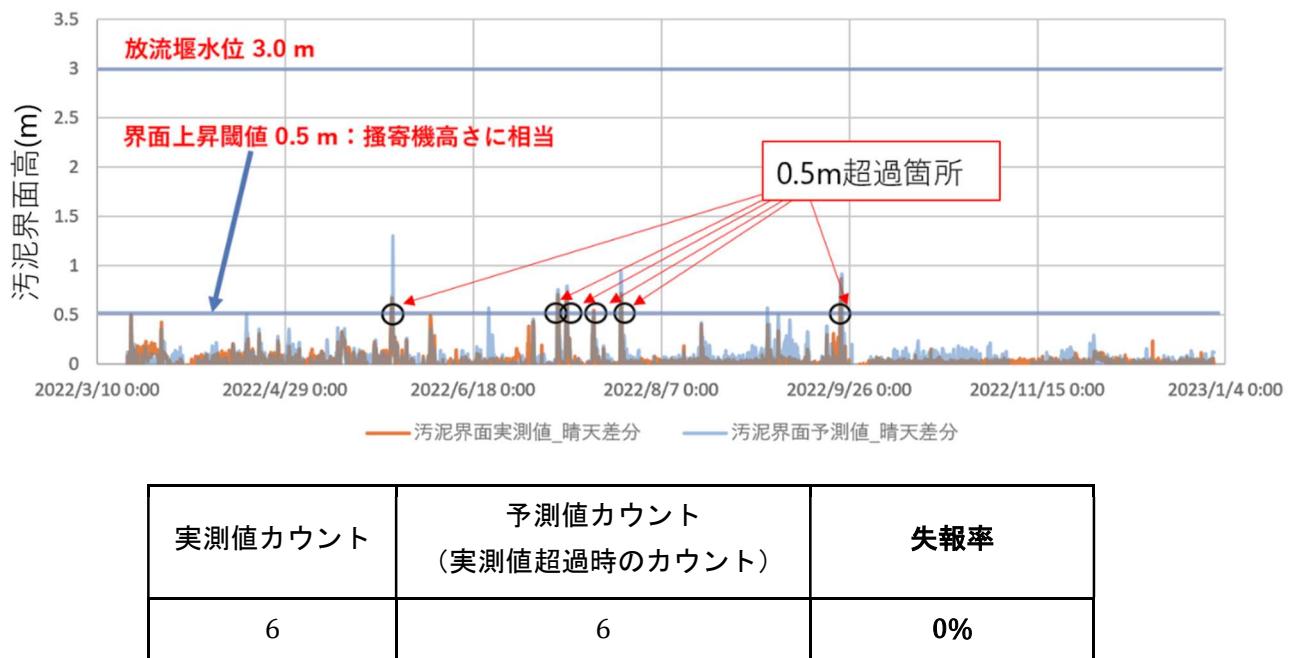


図2-20 汚泥界面予測技術の結果（実測値と予測値）

§ 13. 多目的最適化技術の評価

運転ガイダンスは多目的最適化技術を用いて運転ガイダンスを実施したため、その実証結果、並びに評価結果を示す。多目的最適化（運転ガイダンス）に関してはそれぞれの優先事項を元にガイダンス値を評価し、それぞれの項目で目標性能を満たすことができている。

【解説】

多目的最適化技術は運転ガイダンスに用いられており、運転ガイダンスの目標値に関してはそれぞれの各運転モードに対して評価を実施する。今回の実証では運転ガイダンスの目標性能を表2.8の通り定めた。

表 2.8 各運転モードにおける目標値

指標 \ モード	水位重視運転	コスト重視運転	水質重視運転
リスク回避	浸水リスクの低減 流入渠水位が管理基準 (流入渠水位 5.8m) を超える 回数を 10%低減	実運転と同程度とする	実運転と同程度とする
省エネ	実運転と同程度とする	処理コストの低減 雨天時電力量を 1.5%削減	実運転と同程度とする
水質	雨天時放流水質目標値順守	雨天時放流水質目標値順守	晴天時同等の放流水質 (※)

(※) 本実証では、実証地の実情を踏まえて、水質汚濁防止法4条に規定された総量規制値に対し、その80%を雨天時目標水質、60%を晴天時目標水質と設定した。

運転ガイダンスの実例を図2-21に示す。

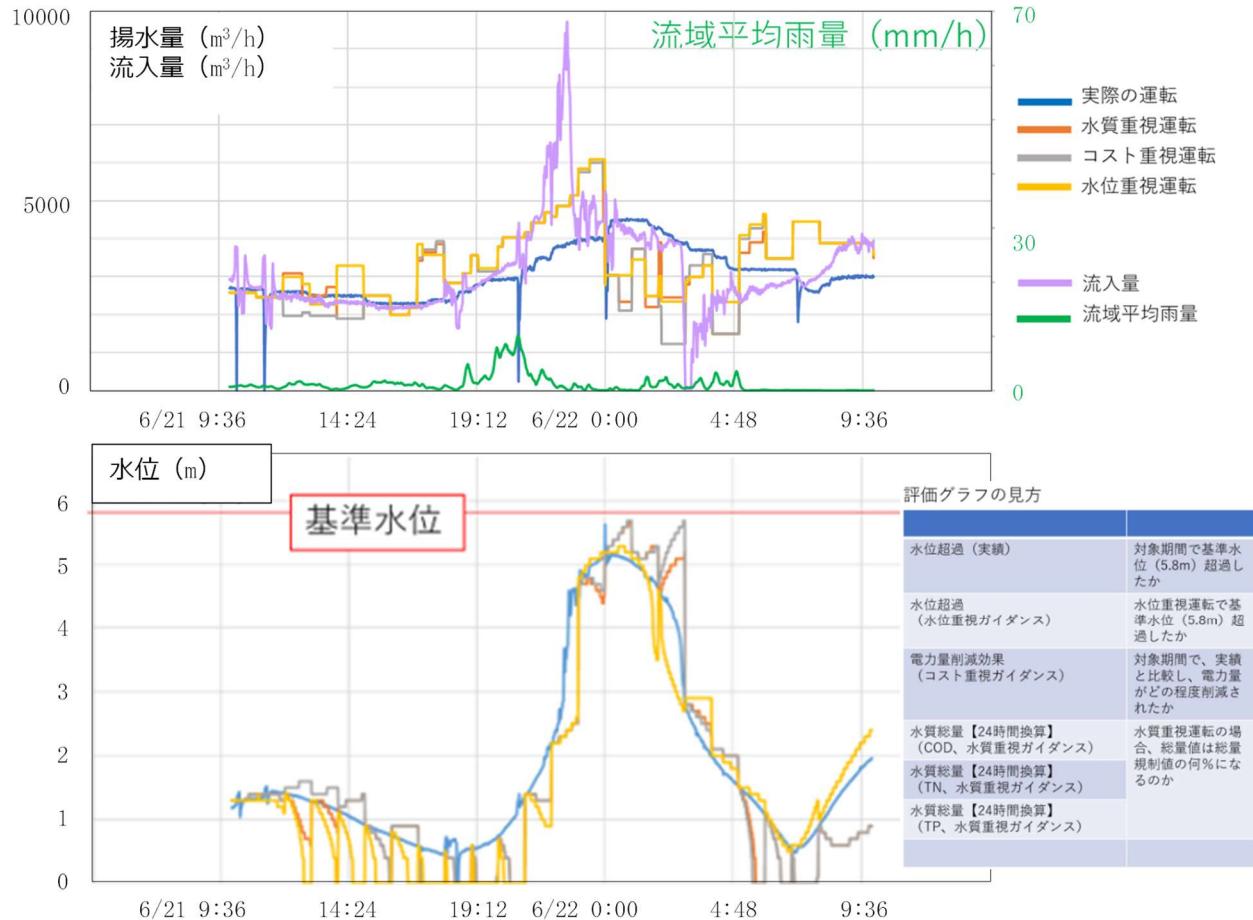


図2-21 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（凡例）

図表の見方

左上図：

実際の揚水量、運転ガイダンスが示す揚水量、ならびに実際の流入量、流域平均雨量を記載している。実際の揚水量【青線】に加え、運転ガイダンス値（水質重視【橙色】、コスト重視【グレー】、水位重視【黄色】）との比較が可能であり、さらにその際の流入量【紫色】や、流域平均雨量【緑色】も確認可能である。

左下図：

実際の流入渠水位【青線】、運転ガイダンス通りに運転した場合の流入渠水位（水質重視【橙色】、コスト重視【グレー】、水位重視【黄色】）を示す。また基準水位を赤線で記載しており、基準水位を超過しているか否かを確認可能である。

右下表：

各運転を評価するにあたり、評価指標に沿って対象期間がどのような判定にあるかを判定する。

水位超過（実績）：

実際の運転操作にて基準水位（今回実証では5.8m）を超過したか否かを判定する。

水位超過（水位重視ガイダンス）：

水位重視の運転ガイダンスに従った場合、基準水位（5.8m）を超過していたか否かを判定する。

電力量削減効果（コスト重視ガイダンス）：

実際の運転に対して、コスト重視運転ガイダンスがどれだけ、電力量を削減できているかを示す。コスト重視運転ガイダンスが実際の電力量より大きくなる場合、本指標はマイナスとなる。

水質総量【24時間換算】（COD/TN/TP、水質重視ガイダンス）：

水質重視ガイダンスに従った場合、水質総量値が総量規制値の何%になるかを記載する。今回の実証での晴天時運転目標は60%であり、雨天時運転目標は80%である。

実例として9/23の事例を図2-22に示す。9/23の事例では実際の運転では19:00以降に基準水位を超過している（青線）が、水位重視の運転ガイダンスに従った場合（黄線）、水位基準値5.8mは超過していないことが確認できる。

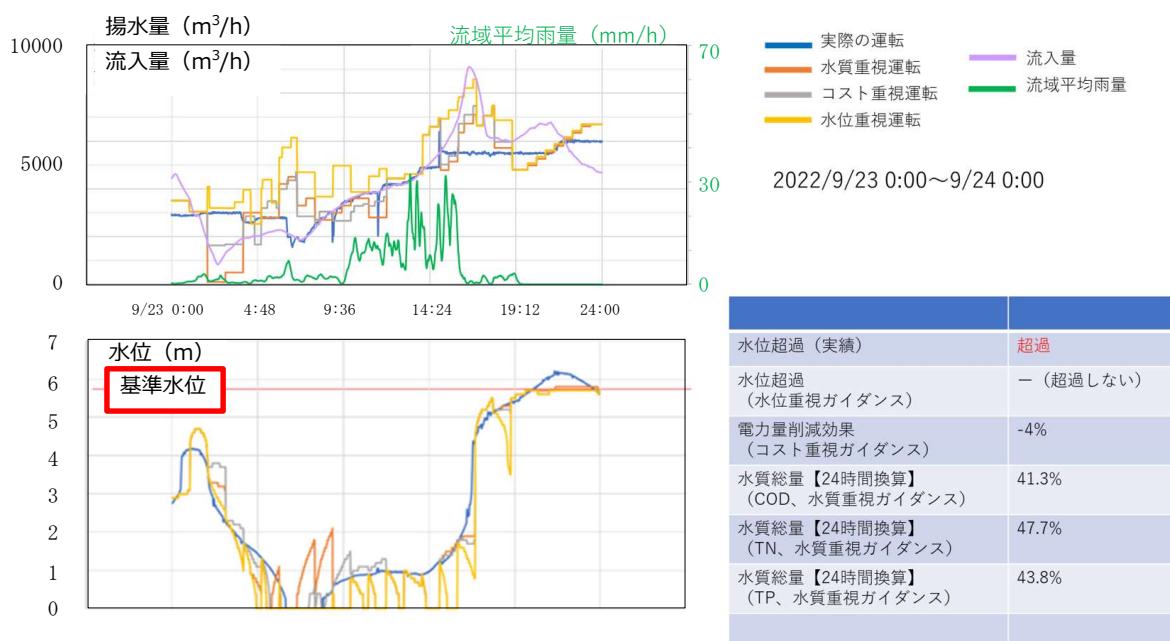


図2-22 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（9/23の事例）

本例に関して考察を実施した図を図2-23に示す。9:00～14:00までは流入渠水位が低く、実際の揚水量設定値は「コスト重視運転」「水位重視運転」の運転ガイダンス値とほぼ同一の値を設定している。一方で14:00以降は運転ガイダンスは流入量の増加を検知し（紫線） $6,000\text{m}^3/\text{h}$ 以上の揚水量を運転ガイダンスしている（黄線）。一方で実際の運転は $5,000\text{m}^3/\text{h}$ を超えない揚水量を設定している（青線）。運転実態として $5,000\text{m}^3/\text{h}$ 以上の揚水量は運転管理者【公社】の許可が必要な揚水量となっており、操作員は $5,000\text{m}^3/\text{h}$ 以上の揚水量を設定することをためらったものと想定される。そのため、実際の運転では基準水位（5.8m）を超過しており、運転ガイダンスでは5.8mを超過しなかったものと考察できる。

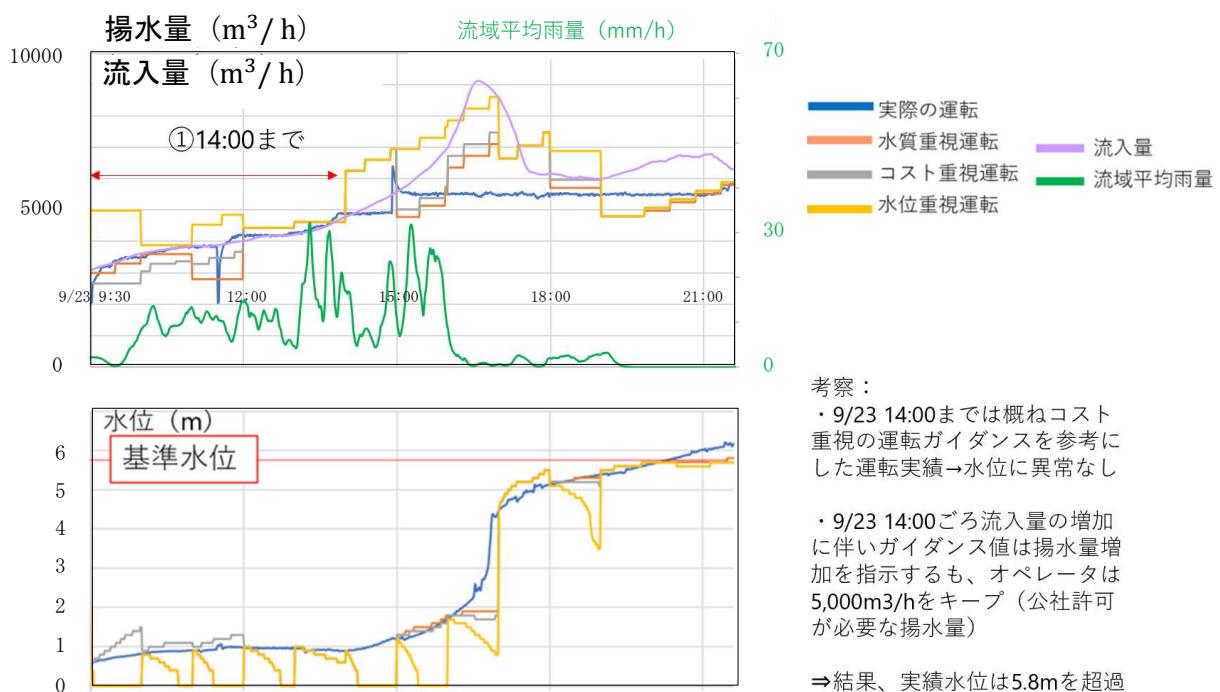


図2-23 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（9/23の事例詳細）

実証により得られた具体的なガイダンス事例集に関しては資料編2に記載している。統括した結果を表2.9に示す。目標値に対して十分な到達が確認されている。

表 2.9 ガイダンスシステムの実証結果

	目標効果	具体的到達目標	評価結果
水位重視運転	浸水リスクの低減	流入渠水位が管理基準（流入渠水位 5.8m）を超える回数を 10%低減	○ 100%低減 (超過回数 2回⇒0回)
コスト重視運転	処理コストの低減	雨天時電力量を 1.5%削減	○ 雨天時電力量を 5.0%削減
水質重視運転	良好な放流水質	水質に関する 総量規制値の60%以下、又は水質汚濁防止法第4条の5第1項記載の管理基準値を確保する	○ 水質に関する 総量規制値の60%以下を満たしている