

ISSN 1346-7328
国総研資料 第1324号
令和7年11月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1324

November 2025

B-DASH プロジェクト No.43

AI を用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策支援技術
導入ガイドライン（案）

上下水道研究部下水処理研究室

B-DASH Project No.43

Guideline for Introducing an AI-based Technology to Support Countermeasures for Wet Weather Infiltration in Separate
Sewer Systems

Wastewater and Sludge Management Division
Water Supply and Sewerage Department

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

B-DASHプロジェクト No.43
AI を用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策支援技術
導入ガイドライン(案)

上下水道研究部 下水処理研究室

B-DASH Project No.43
Guideline for Introducing an AI-based Technology to Support Countermeasures for Wet Weather Infiltration in Separate Sewer Systems

Wastewater and Sludge Management Division
Water Supply and Sewerage Department

概要

本ガイドラインは、下水道事業における防災・減災の推進、及び下水処理場運転操作の効率化に寄与するため、下水道革新的技術の一つである「AI を用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策支援技術」について、下水道事業者が導入検討する際に参考にできる資料として策定したものである。

キーワード : AI、分流式下水、雨天時浸入水、運転効率化

Synopsis

This Guideline for Introducing an AI-based Technology to Support Countermeasures for Wet Weather Infiltration in Separate Sewer Systems, which is one of sewage high technologies, is designed to promote the disaster prevention and mitigation in wastewater service, and supports sewage works administrator's consideration for introduction.

Key Words : AI, separate sewer systems, wet weather infiltration, operational efficiency

執筆担当者一覧

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 室長 重村 浩之

前 國土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 室長 田鷗 淳

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 主任研究官 太田 太一

前 國土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 主任研究官 岩渕 光生

国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 研究官 石井 淑大

前 國土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室 研究員 陣矢 昂汰

前 國土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官 中村 憲明

前 國土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官 藤井 都弥子

はじめに

我が国の下水道は、国民生活に不可欠な社会資本として、81.8%（令和5年度末下水道処理人口普及率）まで普及が進んできている。その一方で、標準耐用年数が経過し老朽化した施設が今後、急速に増加することが予測されている。分流式下水道の管路施設においても老朽化等が進行し、分流式でありながら雨水が污水管に浸入することで、雨天時に下水処理場への流入水量が増加する事象が発生している。そのため下水処理場においては技術者による天候変化や水質変動に留意した運転が必要とされている。

しかし近年、下水道技術者の担い手が不足し、熟練した運転技術をいかにして継承していくかということが課題となっている。また、下水道事業では処理場における曝気やポンプ稼働に多くの電力を必要とするため、地方公共団体の事業の中でもエネルギー消費由来の大きな温室効果ガス排出源となっている。このような状況を背景に、下水処理場における効率的な運転管理及びその支援をする新たな技術の開発が求められている。

国土交通省上下水道審議官グループでは、優れた革新的技術の実証、普及により下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー等の創出を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、国土技術政策総合研究所上下水道研究部が実施機関となり「下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト※）」を平成23年度から開始している。実証した技術については、下水道管理者である地方公共団体にも技術の導入検討が簡便に実施できるように技術導入ガイドラインを作成している。

本技術導入ガイドラインは、国土技術政策総合研究所委託研究（AIを用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策技術実証研究 受託者：三菱電機（株）・（大）東京大学・（公財）愛知水と緑の公社・愛知県共同研究体 実施期間：令和3年度～4年度）において実施した成果を踏まえたものである。AIによるデータ解析技術を活用してリアルタイムの降雨データや流量データ、過去の下水処理場運転データから学習した運転パターン等から各パラメータを予測し、主ポンプの揚水量をガイダンスすることで、雨天時の最適な運転操作を支援する技術である。本実証研究では、過去4ヶ月程度のデータから運転パターンを学習することで雨天時の下水処理場における浸水・溢水リスク低減、契約電力量超過の防止、放流水質の遵守等の複数の目標を同時に達成できる最適な運転が実証されている。優れた技術であり、全国そして海外にも普及されることを強く願うものである。

技術選定から実証研究施設の設置、実運転による実証を踏まえた技術導入ガイドラインの作成までを短期間でまとめるにあたり、大変なご尽力をいただいた下水道革新的技術実証事業評価委員会の委員各位、ご協力いただいた下水道事業者および研究体各位等、全ての関係者に深く感謝申し上げる。

※B-DASH プロジェクト：Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project

国土交通省国土技術政策総合研究所 上下水道研究部長 小川 文章

目 次

第1章 総 則

第1節 目的	
§ 1. 目的	1
第2節 ガイドラインの適用範囲	
§ 2. ガイドラインの適用範囲	4
第3節 ガイドラインの構成	
§ 3. ガイドラインの構成	5
第4節 用語の定義	
§ 4. 用語の定義	7

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	9
§ 6. 本技術の概要と特徴	11
§ 7. 本技術を用いた運転操作の改善	24
第2節 システム構成の検討	
§ 8. システム構成の検討	26
第3節 技術の適用条件	
§ 9. 技術の適用条件	28
第4節 技術の評価	
§ 10. 流入量予測技術の評価	34
§ 11. 水質予測技術の評価	36
§ 12. 汚泥界面予測技術の評価	39
§ 13. 多目的最適化の評価	40

第3章 導入検討

第1節 導入効果の検証	
§ 14. 導入効果の検証	45
第2節 システムの設計・導入	
§ 15. 流入量予測技術の設計	51
§ 16. 水質予測技術の設計	55
§ 17. 汚泥界面予測技術の設計	60
§ 18. 運転パターン分類の設計	64
§ 19. 多目的最適化の設計	66

第4章 維持管理

第1節 システムの保守・点検	
§ 20. システムの保守、点検	69
第2節 対象施設・機器変更時の対応	
§ 21. 対象施設、機器変更時の対応	71

資料編

1. 実証概要	資-1
2. 実証結果（ガイドンス事例集）	資-5
3. 費用対効果算出ツールについて	資-20
4. セキュリティ対策	資-24
5. 実証設備操作説明資料	資-25
6. 運転パターン分類技術の詳細	資-33
7. 水質予測技術のその他処理方式への適用について	資-35
8. 参考文献	資-36
9. 問い合わせ先	資-37

第1章 総 則

第1節 目 的

§ 1. 目的

本ガイドラインは、下水道施設における防災減災の推進に向け、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）で採択された「AIを用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策支援技術に関する実証事業」（以下、「本技術」とする）について、実証研究の成果を踏まえて、技術の概要、導入検討・判断、および運用ならびに保守等に関する技術的事項について明らかにし、もって導入の促進に資することを目的とする。

【解説】

下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）は、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業における資源回収、大幅な省エネルギー・創エネルギー効果やコスト縮減を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、国土交通省が実施しているものである。

B-DASH プロジェクト全体の概要は、図 1-1 に示すとおりである。各実証事業においては、国土技術政策総合研究所からの委託研究として、実証研究を実施している。

平成 23 年度は、①水処理における固液分離技術（高度処理を除く）、②バイオガス回収技術、③バイオガス精製技術、④バイオガス発電技術に係る革新的技術を含むシステムについて公募を行い、2 件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成 24 年度は、⑤下水汚泥固形燃料化技術、⑥下水熱利用技術（未処理下水の熱利用に限る）、⑦栄養塩（窒素）除去技術（水処理に係る技術は除く）、⑧栄養塩（リン）除去技術（水処理に係る技術は除く。回収技術を含むことは可）に係る革新的技術について公募を行い、5 件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成 25 年度は、⑨下水汚泥バイオマス発電システム技術（低含水率化技術、エネルギー回収技術、エネルギー変換技術を組み合わせたシステム技術）、⑩管渠マネジメント技術に係る革新的技術について公募を行い、5 件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成 26 年度は、⑪下水汚泥から水素を創出する創エネ技術、⑫既存施設を活用した省エネ型水処理技術（標準活性汚泥法代替技術・高度処理代替技術）、⑬ICT による既存施設を活用した戦略的水処理管理技術、⑭既存施設を活用した ICT による都市浸水対策機能向上技術に係る革新的技術について公募を行い、6 件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成 27 年度は、⑮複数の下水処理場からバイオガスを効率的に集約・活用する技術、⑯バイオガスから CO₂ を分離・回収・活用する技術、⑰設備劣化診断技術、⑱都市域における局所的集中豪雨に対する降雨及び浸水予測技術、⑲下水管路に起因する道路陥没の兆候

を検知可能な技術、⑯下水処理水の再生利用技術に係る革新的技術について公募を行い、9件の実証研究を採択した。その後、実証成果を元に、⑯⑰⑱⑲についてガイドライン案を策定した。

平成28年度は、⑯中小規模処理場を対象とした下水汚泥の有効利用技術、⑯ダウンサイジング可能な水処理技術に係る革新的技術について公募を行い、4件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成29年度は、⑯汚泥消化技術を用いた地産地消型エネルギー・システムの構築に向けた低コストなバイオマス活用技術、⑯省エネ社会の実現に向けた低コストな地球温暖化対策型汚泥焼却技術、⑯既設改造で省エネ・低コストに処理能力（量・質）を向上する技術に係る革新的技術について公募を行い、3件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

平成30年度は、⑯ICTを活用した効率的な下水道施設（処理場・ポンプ場）管理に関する技術、⑯ICTを活用した効率的管路マネジメント技術、⑯高純度ガス精製・バイオガス利用等による効率的エネルギー化技術、⑯他の熱源よりも低コストに融雪できる下水熱利用技術に係る革新的技術について公募を行い、7件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、⑯⑯、⑯のうちの1技術及び⑯のうちの1技術についてガイドライン案を策定した。

平成31年度は、⑯ICT活用高度処理技術、⑯クラウド・AI活用マンホールポンプ管理技術、⑯AIデータ解析による管内異常検知技術について公募を行い、4件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、⑯⑯についてガイドライン案を策定した。

令和2年度は、⑯災害時対応水処理技術、⑯低コスト汚泥減量化技術、⑯AI活用マンホールポンプ管理技術について公募を行い、3件の実証研究を採択した。その後、実証成果をもとに、ガイドライン案を策定した。

令和3年度は、⑯広域監視制御技術、⑯AI運転支援技術、⑯分流式下水道の流入予測と運転支援技術について公募を行い、4件の実証研究を採択した。

令和4年度は、⑯最初沈殿池におけるエネルギー回収技術、⑯深槽曝気システムにおける省エネ型改築技術について公募を行い、2件の実証研究を採択した。また、令和4年度補正は、⑯消化汚泥から効率的にリンを回収する技術、⑯MAPにより脱水ろ液から効率的にリンを回収する技術、⑯MAP以外で脱水ろ液から効率的にリンを回収する技術について公募を行い、3件の実証研究を採択した。

令和5年度は、⑯発酵熱を利用した効率的なコンポスト化技術、⑯汚泥付加価値向上のための超高温炭化技術について公募を行い、2件の実証研究を採択した。

本技術は、⑯に係る革新的技術であり、実証研究のとりまとめにあたっては、専門的知識を有する有識者及び実務に精通した地方公共団体の下水道事業者より意見を聴取したうえで、学識経験者で構成される「下水道革新的技術実証事業評価委員会」（以下、「評価委員会」とする。（<https://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>）にて、十分な成果が得られたと評価された。

近年、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、降雨時に下水

の流量が増加し、汚水管等からの溢水や宅内への逆流など雨天時浸入水に起因する事象が発生している。本技術は雨天時浸入水に対し、AI技術を活用し、流入水量予測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可能とし、かつそれ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・浸水を回避する革新的技術として採択されたものであり、本ガイドラインは評価委員会で評価された本技術の実証研究（令和3年度から令和4年度にかけての2年間）の成果を踏まえ、本技術の導入の促進に資することを目的として、国土技術政策総合研究所において策定したものである。このため、本ガイドラインでは、地方公共団体等の下水道事業者が本技術の導入を検討する際に参考にできるよう、技術の概要と評価、導入検討および維持管理等に関する技術的事項についてとりまとめている。

なお、本ガイドラインについても、実証研究の成果と同様に、専門的知識を有する有識者及び実務に精通した地方公共団体の下水道事業者より意見を聴取のうえ、評価委員会の評価を受け、了承されたものである。

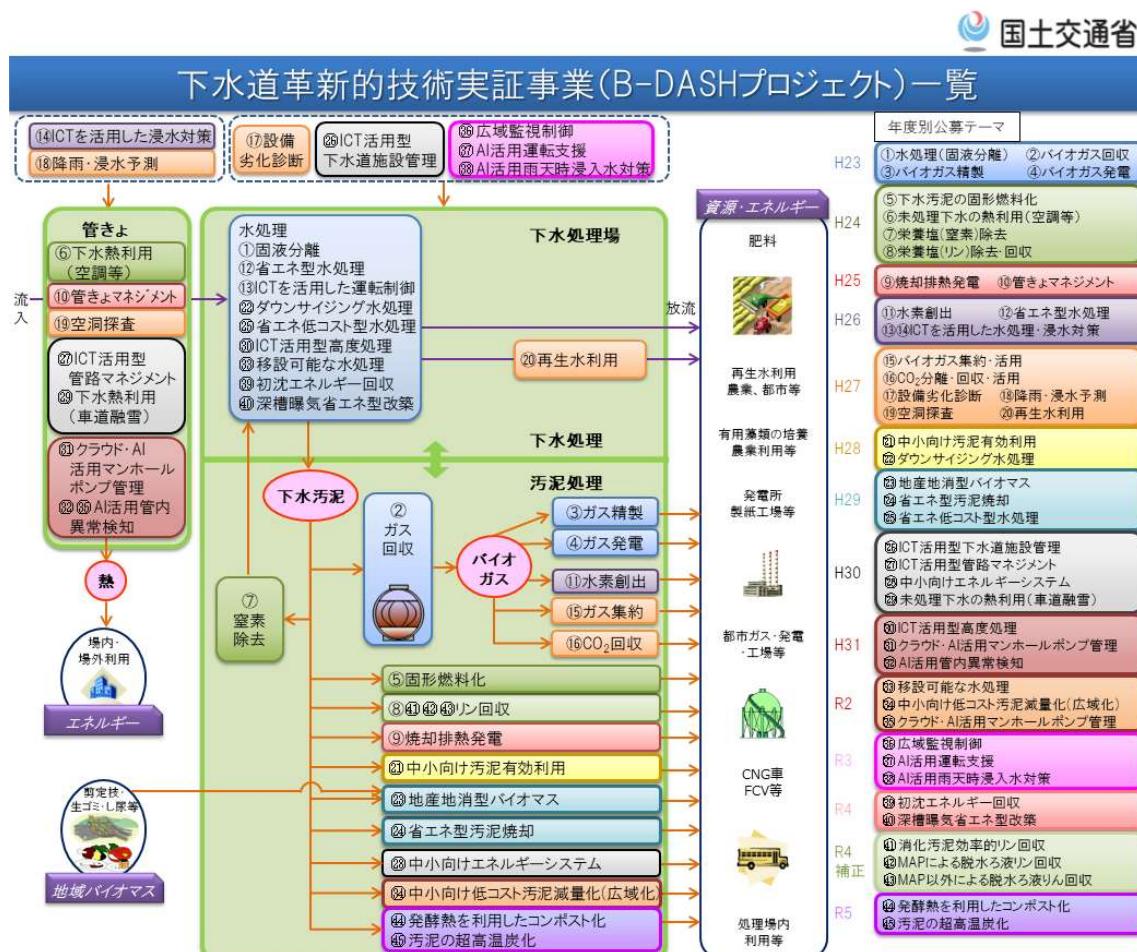


図1-1 下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）の概要（全体）

第2節 ガイドラインの適用範囲

§ 2. ガイドラインの適用範囲

本ガイドラインは、本技術のシステム全体または一部についての、下水道施設を対象とした導入検討・判断、および運用ならびに保守等に適用する。

また本ガイドラインは、地方公共団体等の下水道事業者、および関連する民間企業等に利用されることを想定して策定している。

【解説】

本ガイドラインは、下水道施設を対象として、本技術のシステム全体または一部を導入する際に、導入検討・判断、および運用ならびに保守等の参考となるように取りまとめたものである。

また、本ガイドラインは、地方公共団体等の下水道事業者、および関連する民間企業等に利用されることを想定して策定している。

本ガイドラインに記載する技術等は、多くの地方公共団体に活用してもらえるように、考え方の一例を記載したものであり、ここに記載されている内容以外に、各地方公共団体の実績やストックマネジメントの実践に基づく創意工夫を妨げるものではない。

第3節 ガイドラインの構成

§ 3. ガイドラインの構成

本ガイドラインは、総則、技術の概要と評価、導入検討、維持管理および資料編から構成される。

【解説】

本ガイドラインは、図1-2 に示す構成からなる。

第1章から第2章までは今回適用したAI技術の概要・適用条件、ならびに実証事業を踏まえた評価について記述する。第3章から第4章までは、導入検討、維持管理について記述する。

(1) 第1章 総則

第1章では、目的、ガイドラインの適用範囲、ガイドラインの構成、用語の定義について記述する。

(2) 第2章 技術の概要と評価

第2章では、今回適用したAI技術の概要・適用条件について記述している。技術の目的、技術全体及び各技術の概要と特徴、各技術の適用条件と推奨条件について整理するとともに、データ取得に必要なシステム構成検討方法を示す。また、B-DASH 実証研究で得られた成果に基づく革新的技術の評価結果を示す。

(3) 第3章 導入検討

第3章では、導入効果の事前検証方法について記述するとともに、今回適用した各種予測技術ならびに最適化技術を各下水処理場へ適用する場合の設計方法について解説する。

(4) 第4章 維持管理

第4章では、本技術導入後の維持管理について説明する。保守点検では、技術全体のシステム保守の要点とデータ分析技術に関するモデルの更新について解説する。

各セクションにおいて、枠書き内は基本事項を、解説欄にはその詳細や補足事項等を記載している。

その他、資料編として、実証研究結果、操作説明資料、問い合わせ先等に関する資料を示す。

第1章 総則

- ・目的
- ・ガイドラインの適用範囲
- ・ガイドラインの構成
- ・用語の定義



第2章 技術の概要と評価

- ・技術の概要
- ・システム構成の検討
- ・技術の適用条件
- ・技術の評価
(流入量予測技術、水質予測技術、汚泥界面予測技術、運転パターン分類技術、
多目的最適化技術の各技術に関して要素ごとに概要評価を記載する)



第3章 導入検討

- ・導入効果の検証
- ・システムの設計、導入



第4章 維持管理

- ・システムの保守、点検
- ・対象（施設・機器）変更時の対応

図1-2 本ガイドラインの構成

第4節 用語の定義

§ 4. 用語の定義

本ガイドラインで扱う用語を、以下に示すとおり定義する。なお、下水道施設の基本的な用語については、「下水道維持管理指針 総論編 マネジメント編 実務編2014年版（（社）日本下水道協会）」¹⁾、「下水道用語集2000年版（（社）日本下水道協会）」²⁾に準拠する。

(1) AI

知的とされる機能を実現しているシステム。本ガイドラインでは雨天時運転ガイダンスシステムを構成する各要素技術（流入量予測技術、水質予測技術、汚泥界面予測技術、運転パターン分類技術、多目的最適化技術）をAI技術として表現する場合がある。

※AIの定義は「AI戦略2022」³⁾を参照した。本定義は大きな曖昧性を持っているが、「AIの定義が曖昧であること自体が、AIの研究を加速している」「厳密に定義することは意味があるとは言えない」という同戦略の思想を尊重し、本ガイドラインでも明確な定義を試みることは控える。

(2) 分流式下水道

汚水と雨水を別々の管渠系統で排除する下水排除方式。

(3) 不明水

不明水とは、分流式下水道において汚水系統に流入する下水のうちで、地下水、直接浸入水などからなるものをいう。

(4) 雨天時浸入水

雨天時浸入水とは、マンホールの蓋穴や汚水管への誤接続などによって、汚水系統に流入する雨水をいう。

(5) 雨天時運転ガイダンスシステム

雨天時運転を操作員にガイダンスするシステム。今回の実証事業において構築したシステムを指す。

(6) タイムエリア法

流入量予測技術にて用いた手法。「浸入水割合（総降雨量のうち、汚水幹線に浸入する雨水の割合）」「到達時間遅れ」から流入量を予測する手法。

(7) 粒子フィルタ

実測データをもとに各パラメータの尤度（ゆうど）を計算し、補正する手法。本ガイドラインでは流入量予測技術における各パラメータの補正技術として適用している。

(8) Nash-Shutcliffe係数 (NS係数)

Nash-Shutcliffe係数は、流量の誤差の大きさを考慮してモデルの精度を評価する指標で、その値が 1 に近いほどモデルの精度はよいとされ、0.7 以上でモデルの再現性が高いとされている。

(9) ASM (Activated Sludge Model : 活性汚泥モデル)

下水処理に関する微生物の活動に伴う物質の収支を、数式の組み合わせで表現した数学モデル。下水処理場における反応槽での水質挙動を予測するために用いる。

(10) Vesilindモデル

最終沈殿池における物質の収支を逐次式の組み合わせで表現した数学モデル。下水処理場における最終沈殿池の汚泥界面変動を予測するために用いる。

(11) 目的関数

モデルのパラメータが最適なものであるか評価するための関数。本事業では雨天時に考慮すべき 3 つの課題「水位」「水質」「電力」は目的関数として扱っている。

(12) 制約関数

最適化をするうえで制約として考慮すべき関数。本事業では「雨天時管理水位」「契約電力量値」「揚水量」「放流水質目標」を制約関数としている。

(13) 多目的最適化

複数の目的関数がある場合において最適となる解集合（パレート解）を探索する手法。本事業ではNSGA II⁴⁾と呼ばれる遺伝的アルゴリズムを用いている。

※詳細は第3節・第5項 (p. 68) を参照。

(14) パレート解

多目的最適化問題において、目的関数同士がトレードオフの関係にある場合、全体目的関数が最小となる解集合のこと。

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。

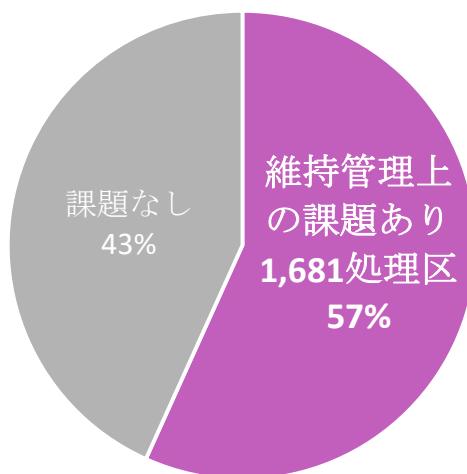


図2-1 雨天時浸入水に関するアンケート調査結果

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年度時点ではピーク時（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。

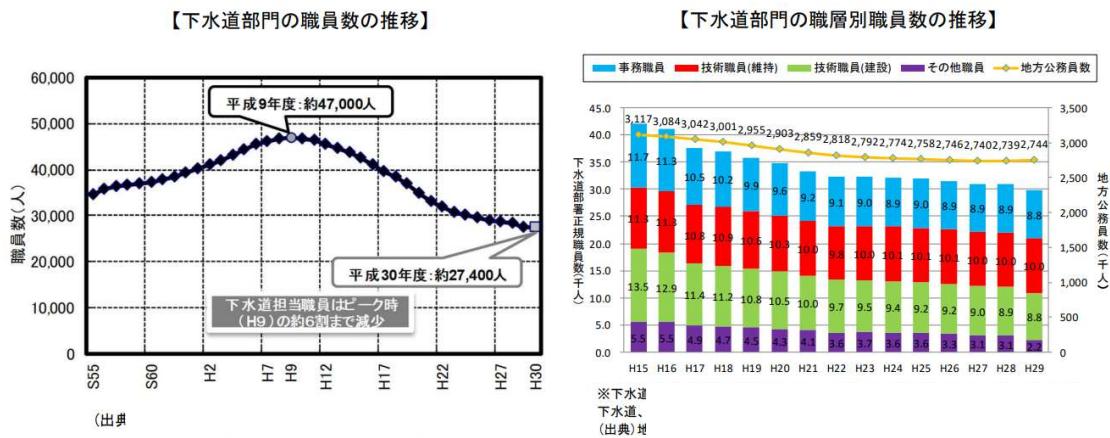


図2-2 下水道部門の職層別職員数の推移

（「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/sewage/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。

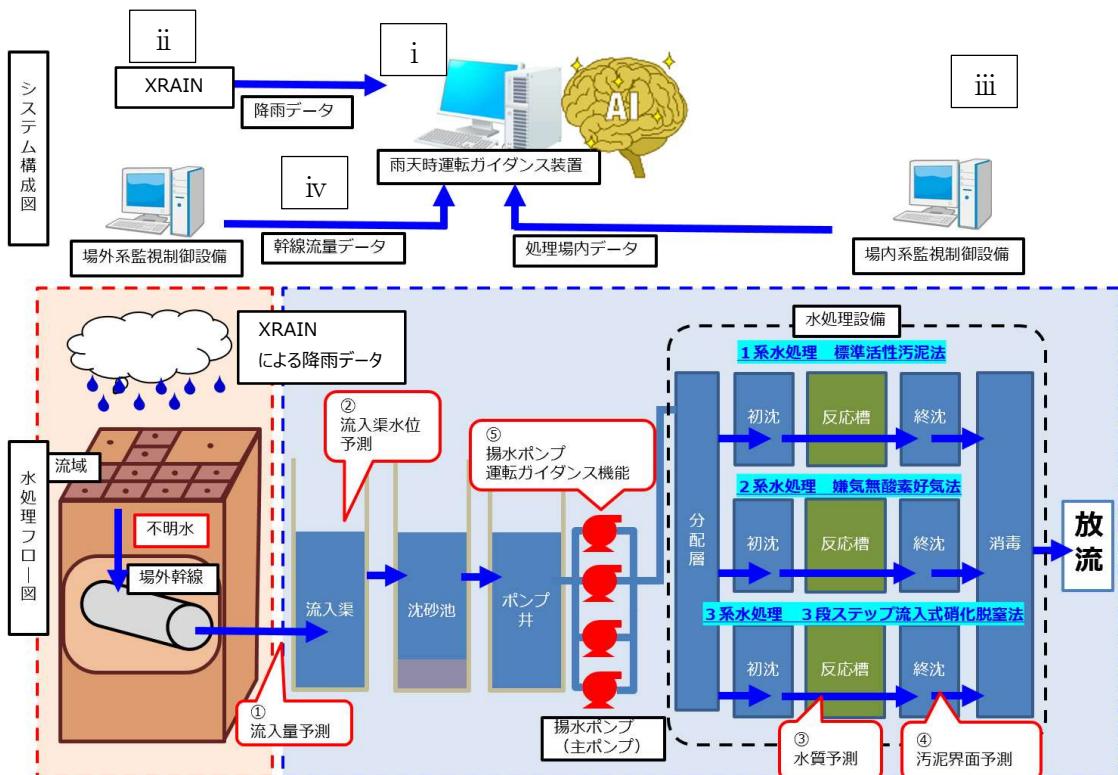


図2-3 雨天時運転ガイダンスシステムのシステム構成図と提供機能

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）。

流入量 P (t) [m³/h]

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

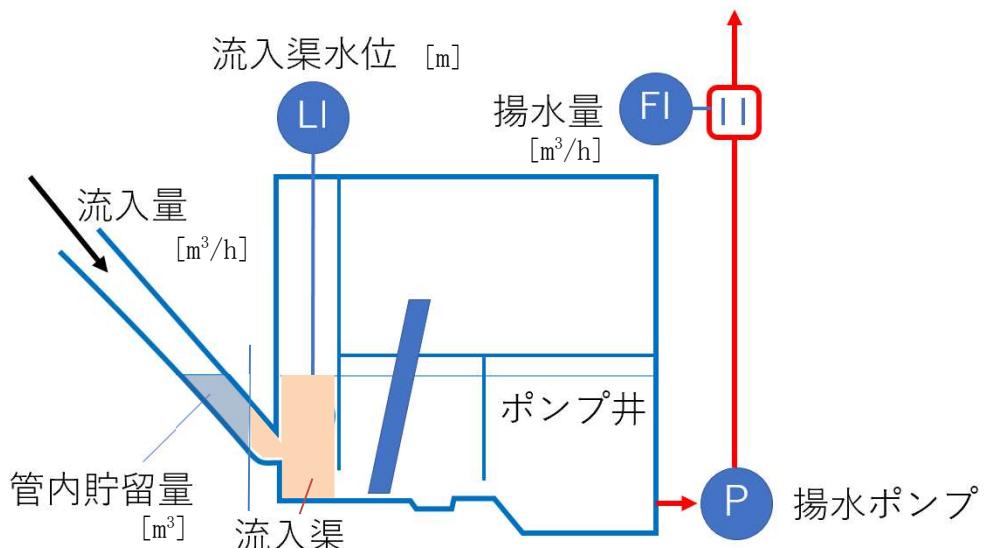


図2-4 流入量算定のための水系図

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。

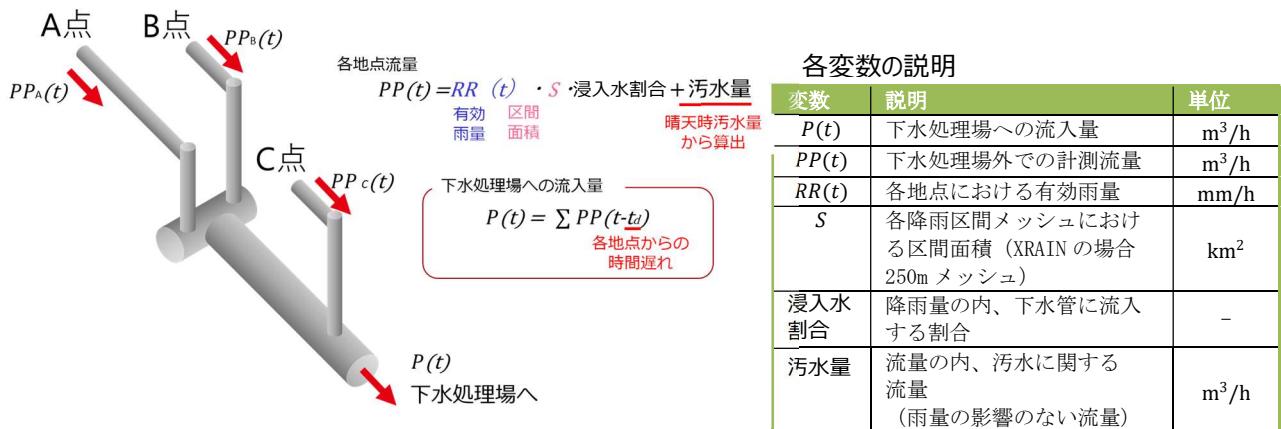


図2-5 タイムエリア法の概念図

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）。

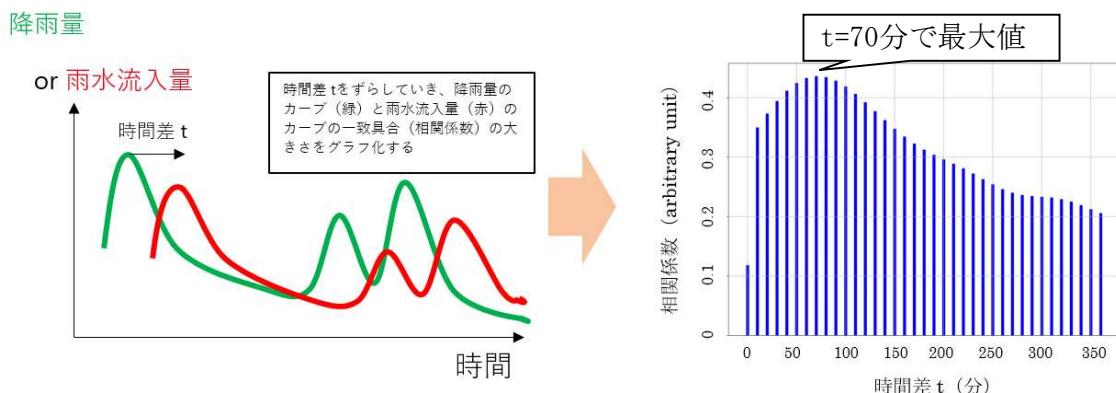


図2-6 降雨量と雨水流入量のカーブ（左図、イメージ図）と
時間差 t に対する相関係数（右図）

【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。

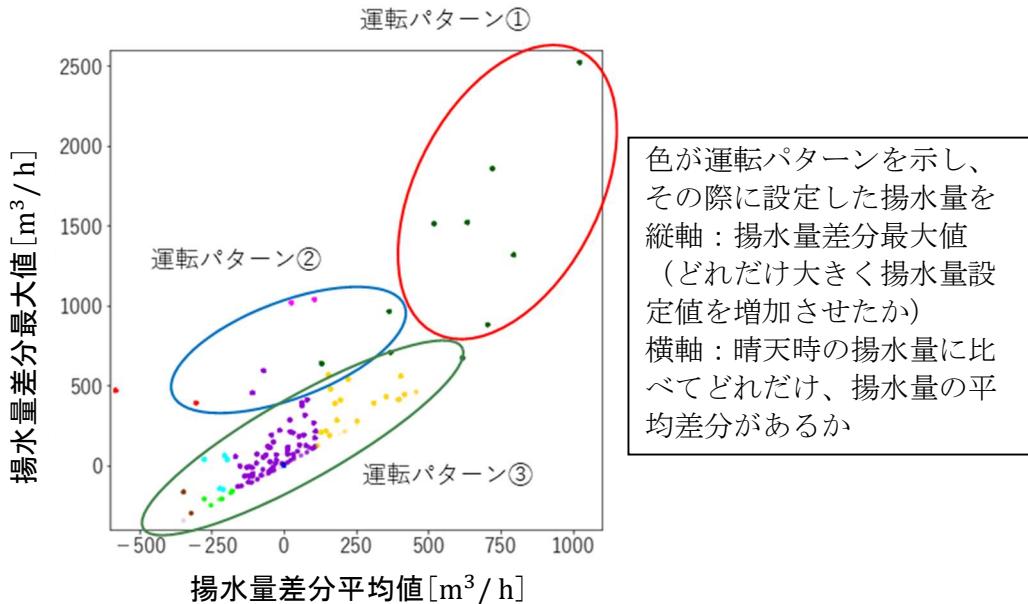


図2-7 揚水量設定値の散布図
(各点は運転パターン分類技術で分類した内容で着色している)

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

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。）

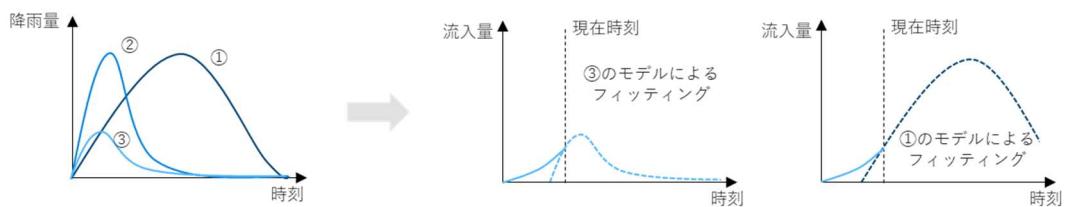


図2-8 作成した3つの降雨パターン（左図）と
それらを選択した場合における流入量予測値のフィッティング方法（右図）

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 $S(t) =$

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。

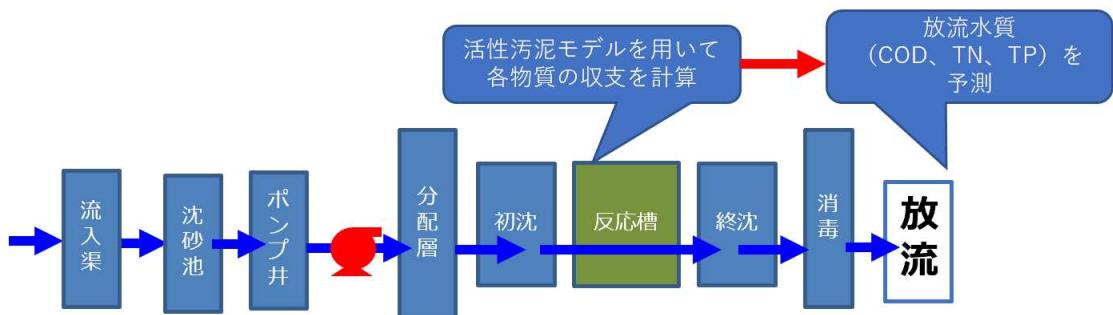


図2-9 ASMを用いて放流水質予測を実施する流れ

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。

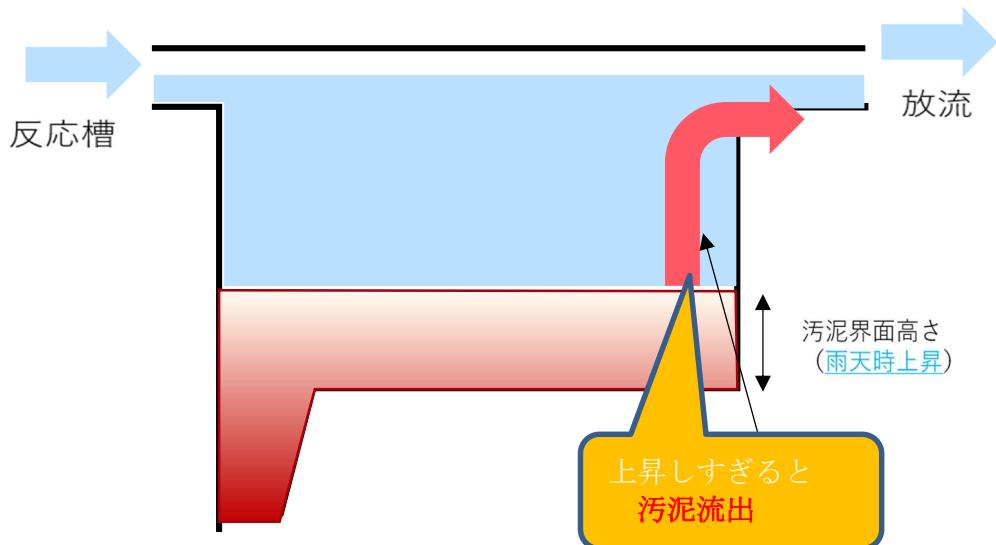


図2-10 最終沈殿池の構造

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_2 契約電力超過しないように…

目的関数： f_3 放流水質も守らないと…

「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

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

目的関数

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

$$f_2 = \max \left(\left(\frac{u(t) - 1000}{u(t) - 1650} \right)^2 \right) \quad \text{電力は低くしたい} \quad \square \quad \text{トレードオフ}$$

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

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

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

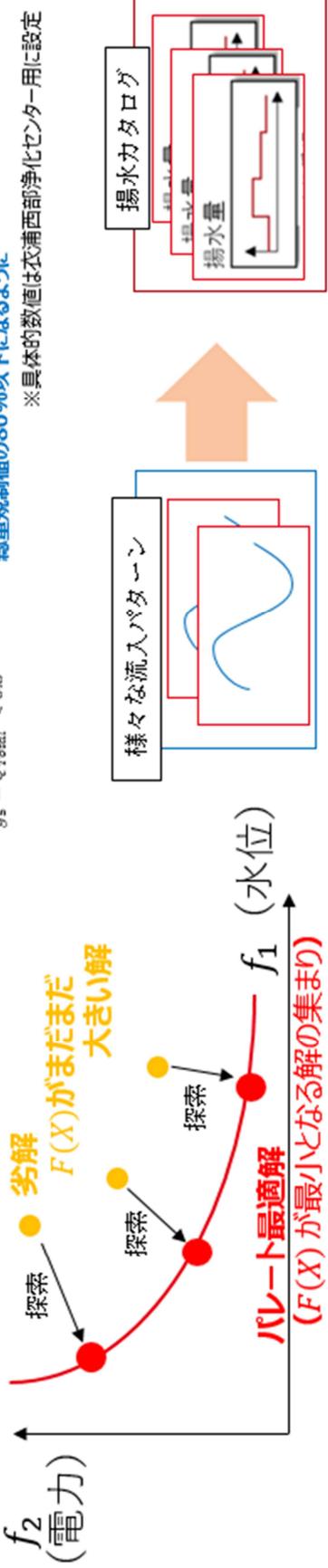


図2-11 多目的最適化の概要

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)

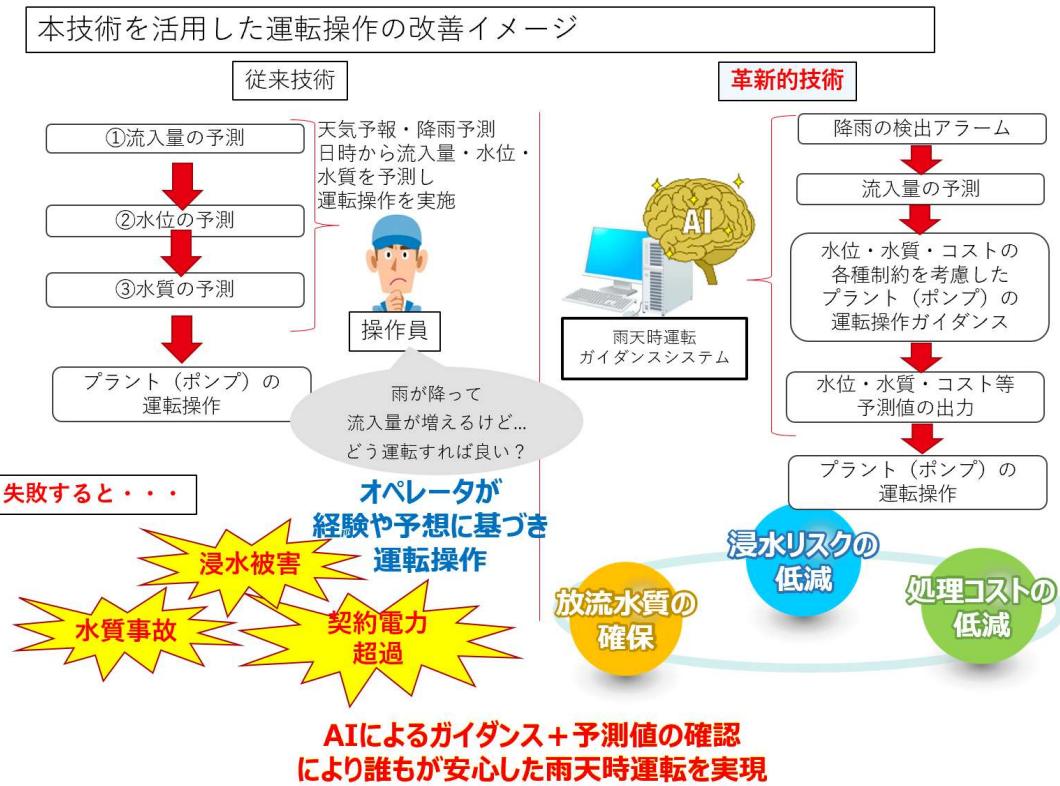


図2-12 雨天時運転ガイダンスシステムによる運転操作の改善イメージ

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。

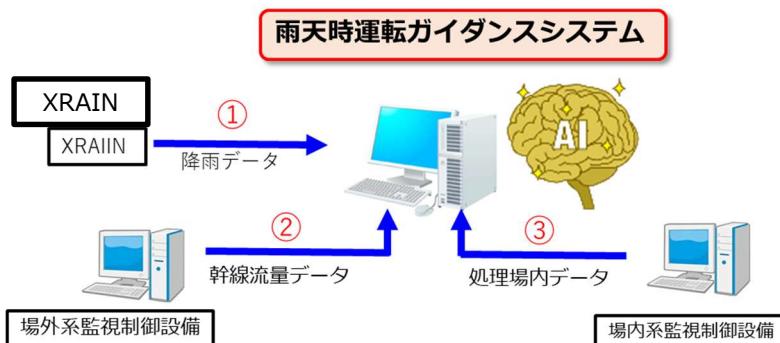


図2-13 雨天時運転ガイダンスシステムのシステム構成図と提供機能

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）。

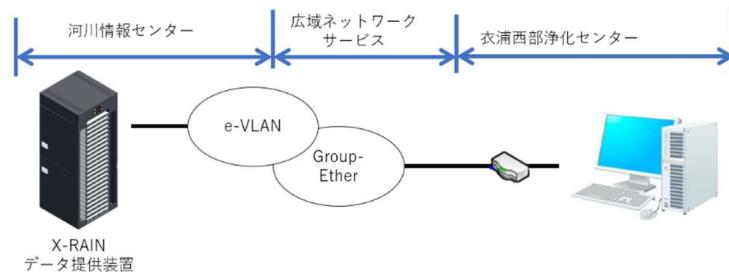


図2-14 降雨情報配信システムのネットワーク構成図

（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
流入量予測技術		<ul style="list-style-type: none"> 下水処理場内流入側に水位計（流量計）がある 	<ul style="list-style-type: none"> 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		<ul style="list-style-type: none"> 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） 	<ul style="list-style-type: none"> 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		<ul style="list-style-type: none"> 汚泥界面を計測している 	<ul style="list-style-type: none"> 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		<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	

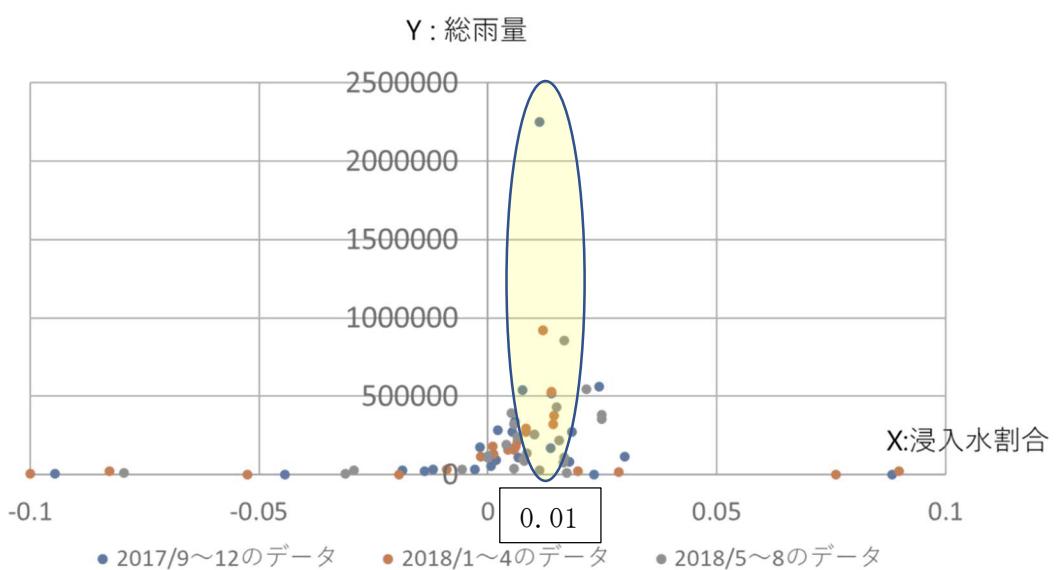


図2-16 浸入水割合の散布図
 (どのデータ期間【色で分類】においても、対象点が浸入水割合 : 0.01付近に集中していることが分かる)

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。

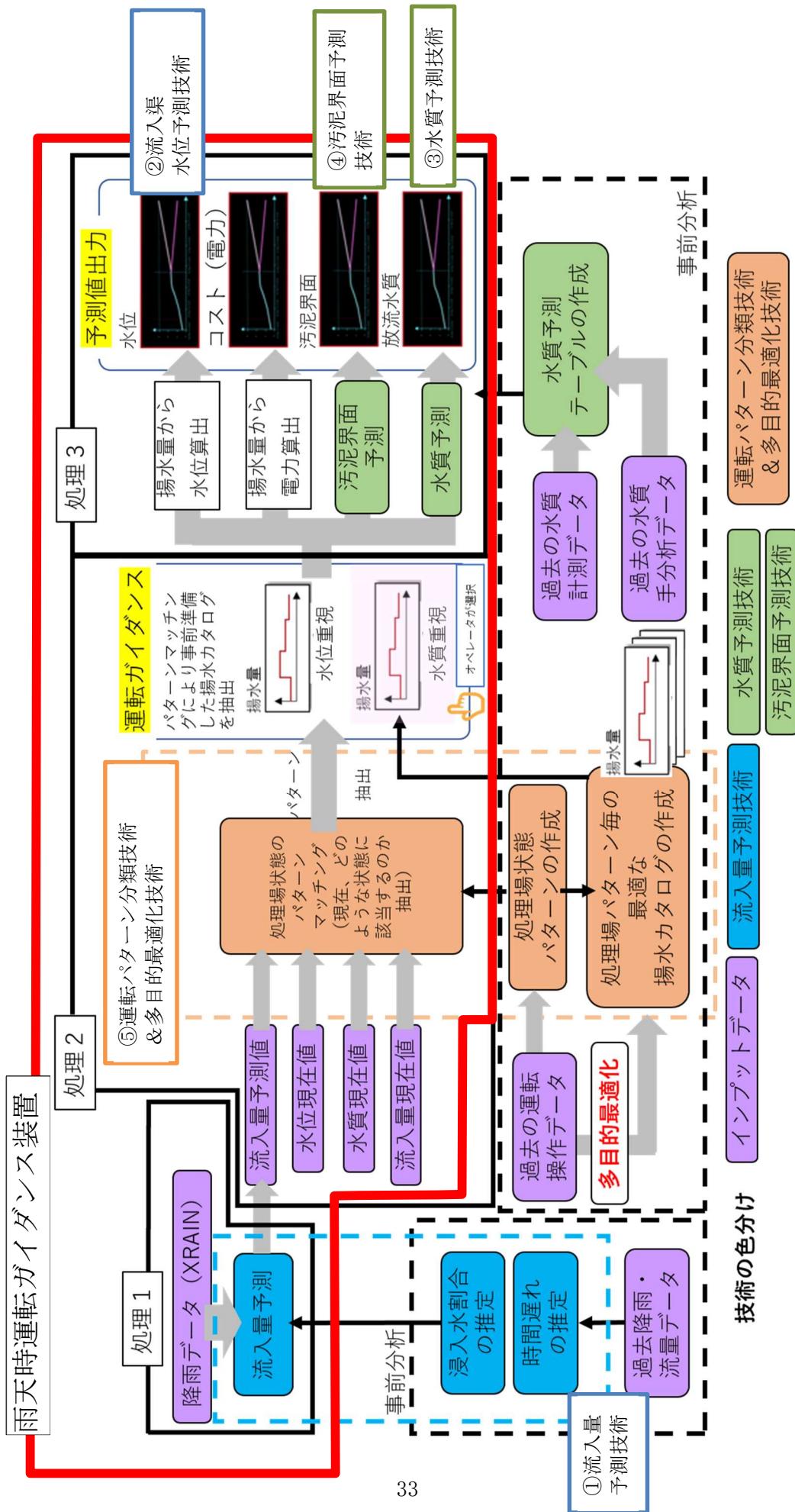


図2-15 雨天時運転ガイダンスシステムの概略演算フロー

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。

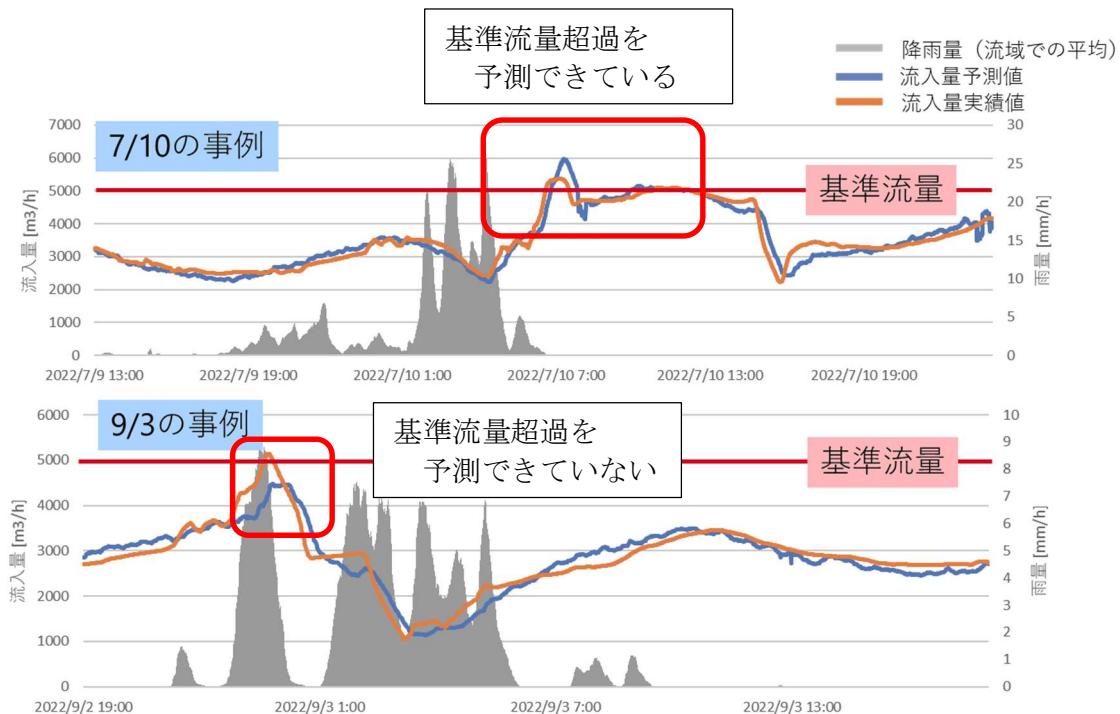


図2-17 流入量予測の参考事例

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。

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

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。

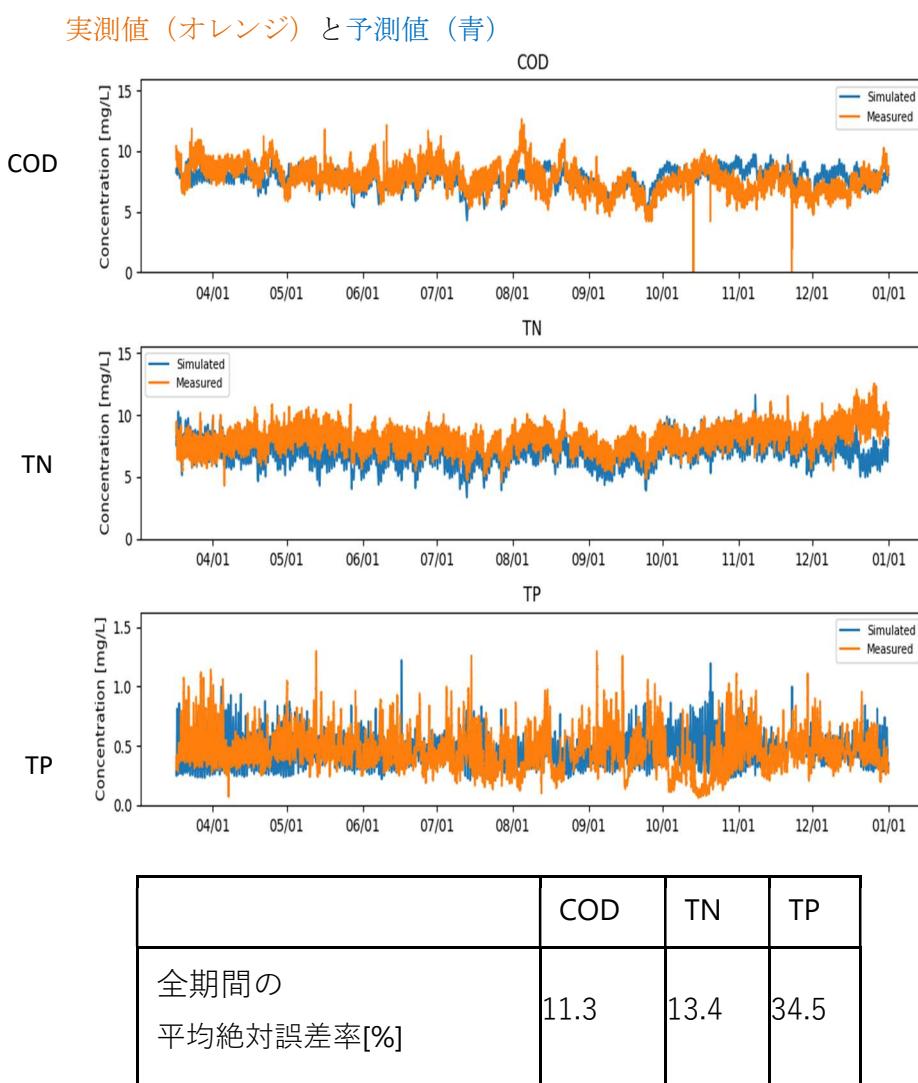
表 2.7 許容誤差の計算例

	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。



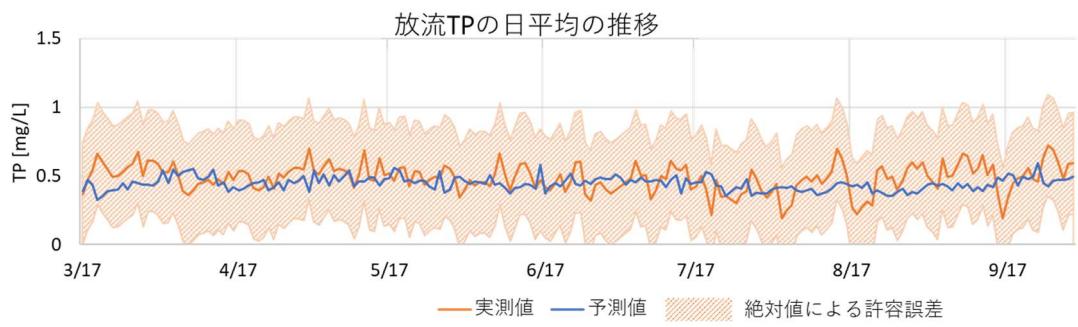


図2-19 放流TPの日平均の推移（実測値と予測値）

（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予測できている。

【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。

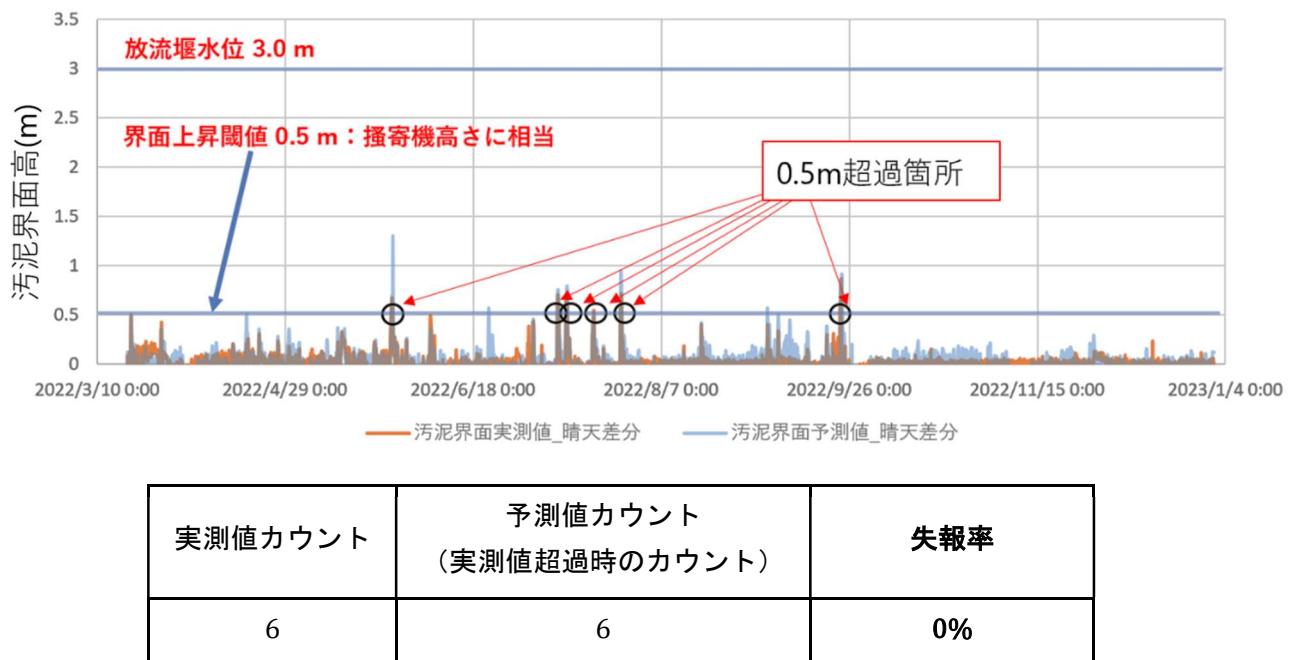


図2-20 汚泥界面予測技術の結果（実測値と予測値）

§ 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。

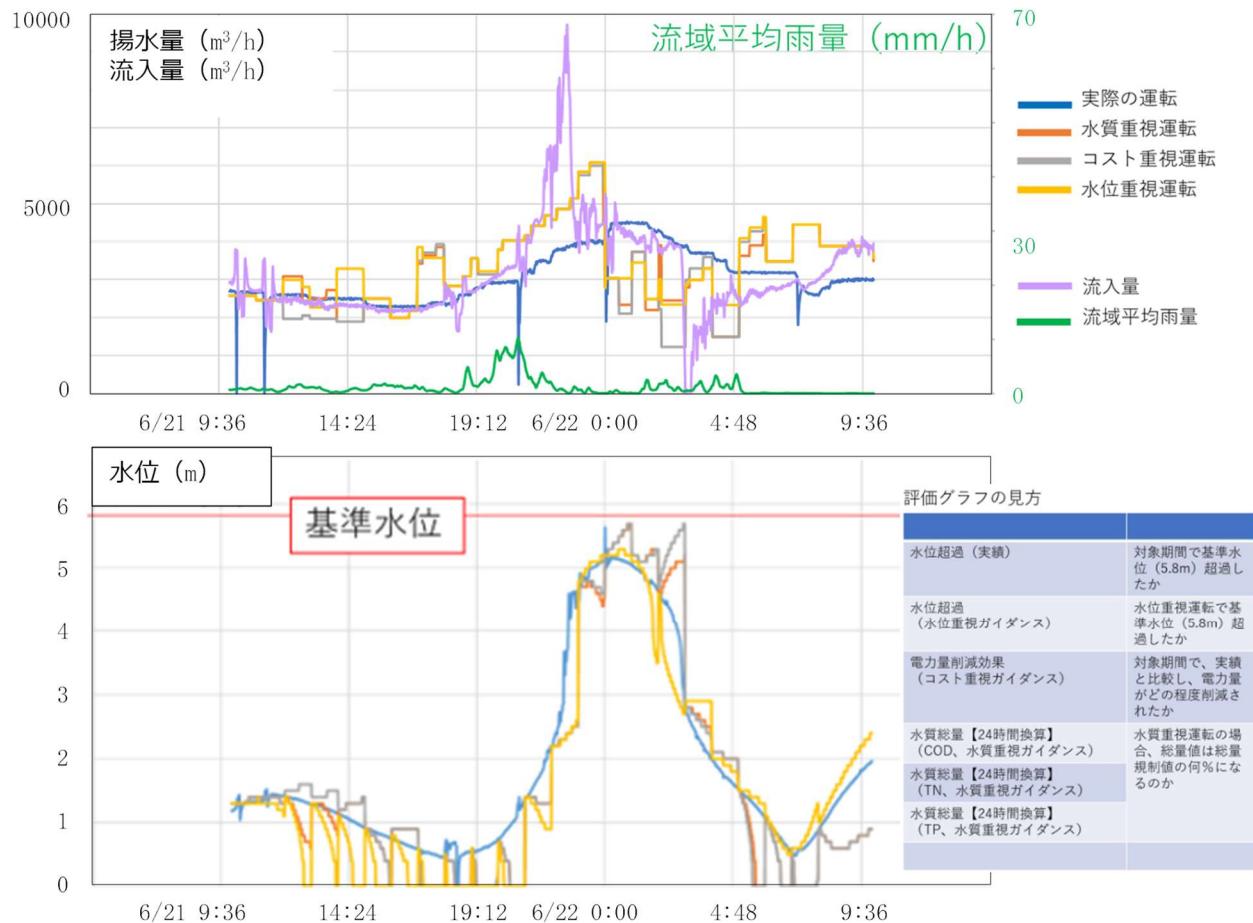


図2-21 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（凡例）

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。

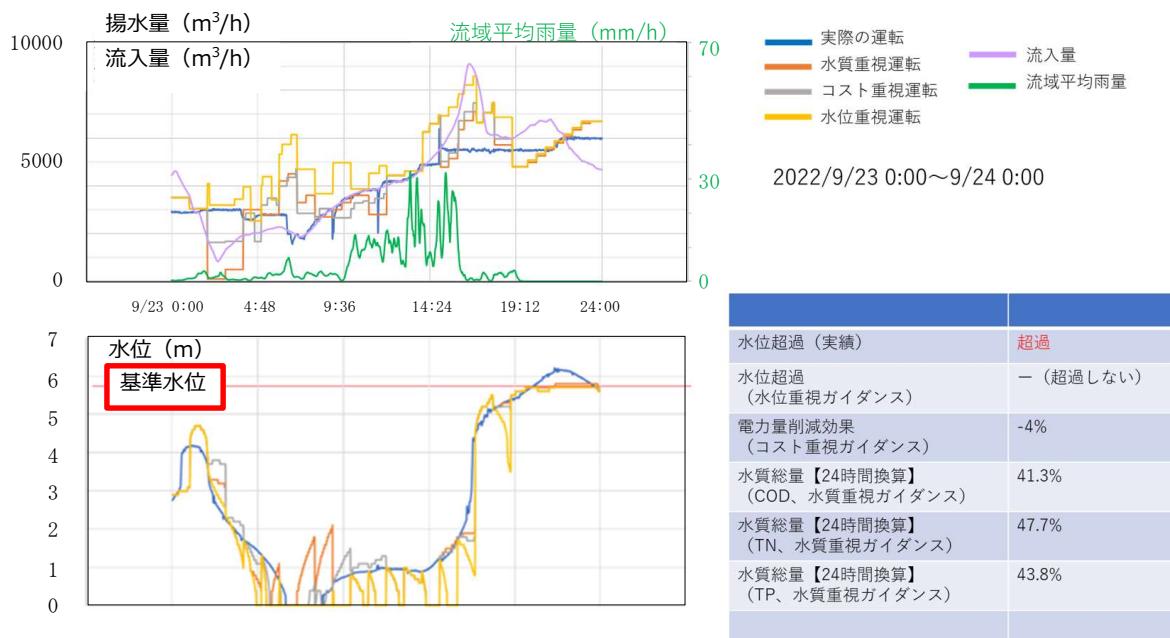


図2-22 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（9/23の事例）

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）6,000m³/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5,000m³/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5,000m³/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5,000m³/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。

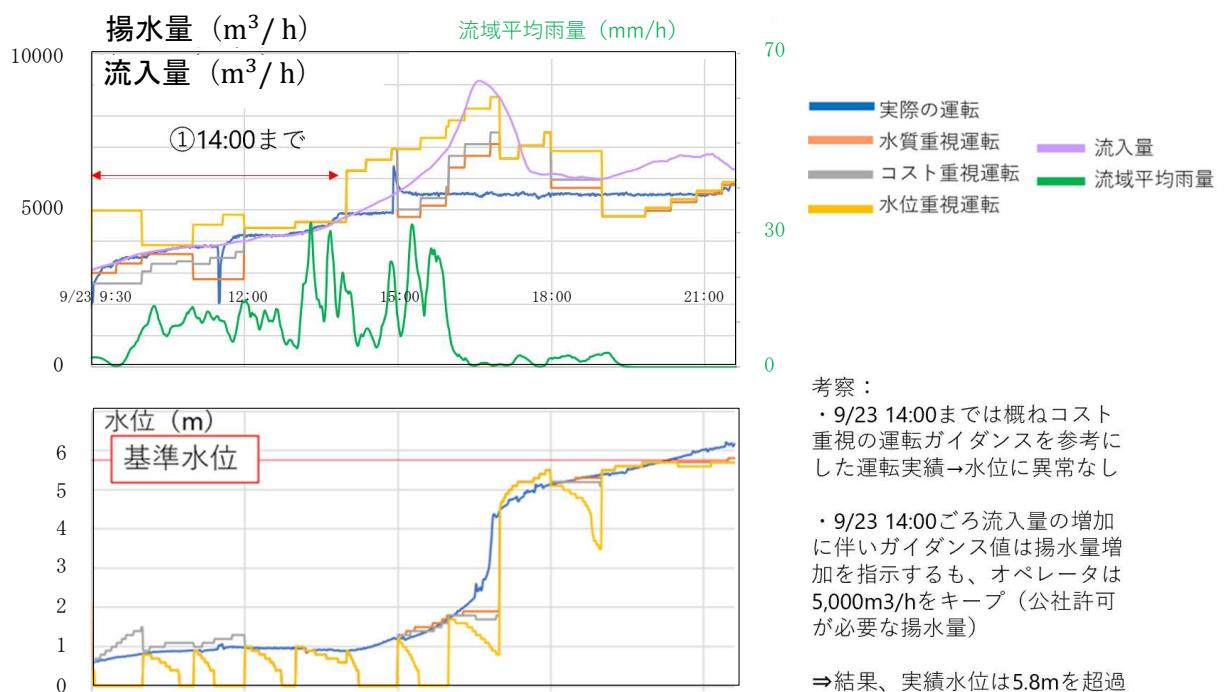


図2-23 運転ガイダンスと実際のガイダンス値の比較結果（9/23の事例詳細）

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

第3章 導入検討

第1節 導入効果の検証

§ 14. 導入効果の検証

本システムの導入効果として、「①浸水被害リスクの低減効果」「②維持管理コストの低減効果」「③費用回収年の算出」を提示する。

【解説】

本システムにより得られる導入効果に関して記載する。本内容を用いた簡易な算定ツールは「資料編3」に示す。

① 浸水被害リスクの低減効果

被害算定の対象箇所として、流入渠水位が高くなることで水没する可能性のある場外設備、および、流入ゲートの操作の不備で水没する可能性のある場内の地下設備までを対象とした。今回の実証施設である衣浦西部浄化センターの主要幹線は埋設位置が深いことから、地上の家屋等は評価の対象から除外しているが、地上の家屋が浸水対象となる場合は、その設備を加算しても良い。参考として今回、被害算定の対象となる場外設備・地下設備を表3.1および表3.2に示す。

表3.1 浸水被害を受ける可能性のある場外施設の一覧

	床面(m)	流入渠水位換算(m)	水没時の管内貯留量(m ³)
第一1号(1-1)流量計室	-6.5.	8.8	14278.7
第二1号(2-1)流量計室	-5.3	10.0	15860.2
第二3号(2-3)流量計室	-5.1	10.2	16022.3
阿久比1号(A-1)流量計室	-4.7	10.6	16267.6
第二2号(2-2)流量計室	-4.1	11.2	16669.1
乙川計測点(1-O)流量計室	-3.7	11.6	16879.0
第一2号(1-2)流量計室	-3.0	12.3	17013.1
阿久比2号(A-2)流量計室	-1.9	13.4	17038.7
阿久比3号(A-3)流量計室	-1.5	13.8	17048.1

表3.2 浸水被害を受ける可能性のある場内施設の一覧

第一P棟地下三階フロア	-7.3	8.0	13074.4
第一P棟地下二階フロア	-3.7	11.6	16879.0
第一P棟地下一階フロア	-0.2	15.1	17078.4

流域の雨天時浸入水率を0.5%、降雨開始時の管内貯留量を2000m³、ポンプの最大揚水量を6500m³/hとし、雨水流入への対応が遅れた場合に発生する下水道施設の想定被害額から、事業実施の効果を求めた。一方、事業を実施した場合の効果は多目的最適化（水位重視運転）により下水処理場への総流入量が到達した場合の最高到

達水位を算定し、本事業を実施した場合の効果を算定した。

算定方法は、「下水道事業における費用対効果分析マニュアル（H28.12 国土交通省水管理国土保全局下水道部）」に準じる。年平均被害軽減期待額は 5,283千円 となる。

表3.3 年平均被害軽減期待額の計算表

年平均超過確率	流量規模						被害額(千円)			区間平均被害額(千円)	年平均区間確率	年平均被害額(千円)	年平均被害額の累計=年平均被害軽減期待額(千円)
	60分降雨量(mm)	流域面積	想定侵入水割合	流域への総雨水量(m ³ /h)	汚水量平均	下水処理場への総流入量(m ³ /h)	①事業を実施しない場合	②事業を実施した場合	③被害軽減額(①-②)				
1/2	38.2	3497	0.50%	1,335,854	2,800	9,479	0	0	0	0	30.0%	0	0
1/5	53.9	3497	0.50%	1,884,883	2,800	12,224	0	0	0	2,500	10.0%	250	250
1/10	65.1	3497	0.50%	2,276,547	2,800	14,183	5,000	0	5,000	20,000	5.0%	1,000	1,250
1/20	76.5	3497	0.50%	2,675,205	2,800	16,176	35,000	0	35,000	80,000	1.7%	1,333	2,583
1/30	83.4	3497	0.50%	2,916,498	2,800	17,382	125,000	0	125,000	142,500	1.3%	1,900	4,483
1/50	92.3	3497	0.50%	3,227,731	2,800	18,939	285,000	125,000	160,000	80,000	1.0%	800	5,283
1/100	104.7	3497	0.50%	3,661,359	2,800	21,107	285,000	285,000	0	0	0.5%	0	5,283
1/200	117.7	3497	0.50%	4,115,969	2,800	23,380	285,000	285,000	0	△△△	△△△	△△△	△△△

② 維持管理コストの低減効果

実証結果より、6か月分のデータで計2回の流入渠管理基準値超過回数を低減することができた。よって年間換算で4回の呼び出し回数が低減できるものと推定する。

設計業務委託等技術者単価を参照し、主任技術者相当が1日対応し、各種手当を考慮すると1回の呼び出しに当たり、100千円の費用がかかると設定することができる。すると年平均維持管理費軽減期待額は400千円となる。

③ 費用回収年の算出

①、②より革新的技術により得られる収益は

$$5,283 \text{ 千円} + 400 \text{ 千円} = \underline{\underline{5,683 \text{ 千円 / 年}}}$$

となる。また、本技術導入に当たり必要な概算費用は

①初期費用

- ・建設費 47,000 千円
- ・水質モデル構築用計装センサ 2,500 千円
(アンモニア濃度計をレンタルとする。)

②ランニング費用

- ・通信費 960 千円

と算出される。よって費用回収は以下の通りとなり、算出される。

表3.4 各年度における損益の計算

	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目	11年目
収益	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683	5,683
費用	-49,500	-960	-960	-960	-960	-960	-960	-960	-960	-960	-960
単年度損益	-43,817	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723	4,723
累計	-43,817	-39,094	-34,371	-29,648	-24,925	-20,202	-15,479	-10,756	-6,033	-1310	3,413



図3-1 費用回収グラフ

費用回収グラフの結果、11年で費用回収が可能となる。

【補足 1】本システムの費用構造

今回実証する雨天時運転ガイダンスシステムは「流入量予測」「水質予測」「汚泥界面予測」「運転ガイダンス（多目的最適化）」という複数の機能により構成されている。本システムのコスト構造を図3-2に記載する。

各種要素技術は共通するデータベースへの格納ルールさえ満たせば、それぞれ独立して演算することが可能なため、各種機能を独立してソフトウェア構築することができる。



図3-2 雨天時運転ガイダンスシステムの費用構造

【補足2】アンモニア濃度計のレンタルに関して

今回設置するセンサとして、「汚泥界面計」は一般的に使用されているセンサであるため、既存のセンサを活用できる場合が多いと考えられる。一方アンモニア濃度計は2010年代より誕生した、比較的新しいセンサであるため、既存のアンモニア濃度計が設置されている機場は少ない想定される。アンモニア濃度計（2式）の備品費は20,000千円となる（本実証における購入金額を参照）。ただし、本技術におけるアンモニア濃度計は水質予測モデル構築における初期パラメータ設定用であり、永続的に必要な訳ではない。よって本センサは1年間レンタルで問題無いと考えられるが、対応可能な業者が2021年度段階で見つかっていないため、本項にてレンタル費用を推定する。

アンモニア濃度計の標準的耐用年数は表3.5より10年とする。これにより推定されるアンモニア濃度計の年間レンタル費用は以下のように計算される。

（アンモニア濃度計 年間レンタル費用）

$$\begin{aligned}
 &= (\text{アンモニア濃度計費用}) \div (\text{耐用年数}) + (\text{メーカ保守費用該当分等}) \\
 &= 20,000 \text{千円} \div 10 \text{年} + 500 \text{千円} \text{ (想定)} \\
 &= 2,500 \text{千円} / \text{年}
 \end{aligned}$$

これによりアンモニア濃度計の費用を購入する場合（20,000 千円）と比較して **17,500 千円削減** することができる。アンモニア濃度計のレンタルを可能とするためには本技術のような、“アンモニア濃度計を活用した技術”の普及展開が必要不可欠であり、雨天時運転ガイダンスシステムの普及展開が同時に求められる。

表3.5 電気設備耐用年数一覧表

大分類	中分類	小分類	標準的 耐用年数 ※1	処分制限 期間年数 ※2
電 氣 計 裝 設 備	計装設備	流量計	10	7
		レベル計		
		質量計		
		温度計		
		pH計		
		ORP計		
		DO計		
		濁度計		
		濃度計		
		M L S S 計		
		S V 計		
		界面計		
		水分計		
		塩素濃度計		
		C O D 水質分析機器		
		全窒素水質分析機器		
		全リン水質分析機器		
		排ガス分析機器		
		雨量計		
		雨量レーダー		

<参考文献、資料>

※標準的耐用年数及び処分制限期間の年数は、国土交通省都市・地域整備局発行の国都下事第77号平成15年6月19日による。

※1：建設省「下水道施設改築・改善マニュアル（案）」による。

※2：処分制限期間は「補助金に係る予算の執行の適正化に関する法律施工令の第14条の規定に基づく。」

第2節 システムの設計、導入

§ 15. 流入量予測技術の設計

流入量予測はタイムエリア法に基づき予測する。設計手法に関しては要素技術ごとに解説する。

【解説】

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3-3に示す。

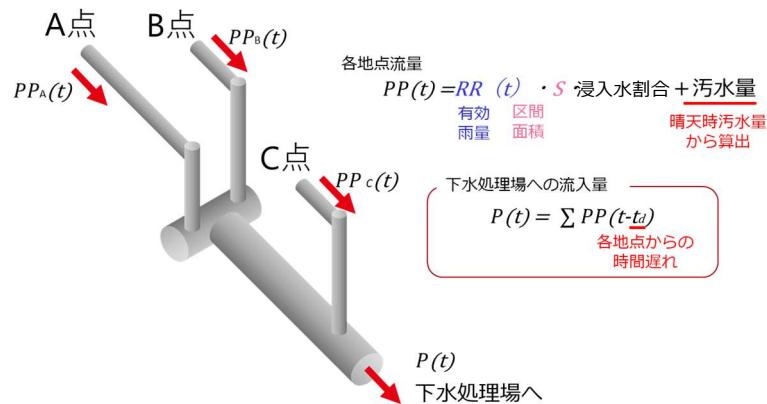


図3-3 タイムエリア法の概念図

タイムエリア法は各地点における流量 $PP(t)$ を以下式で算出する。

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

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 $P(t)$ は以下式で算出される。

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

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。以下、各種パラメータの推定方法を記載する。

汚水量

汚水量は、晴天時の流入量データより算出する。汚水量は「平日」「休祝日」といった曜日と、各時刻により計算することができる。汚水量は流域人員の生活リズムにより日周期的に変動するため、過去晴天時データより算定することができる。

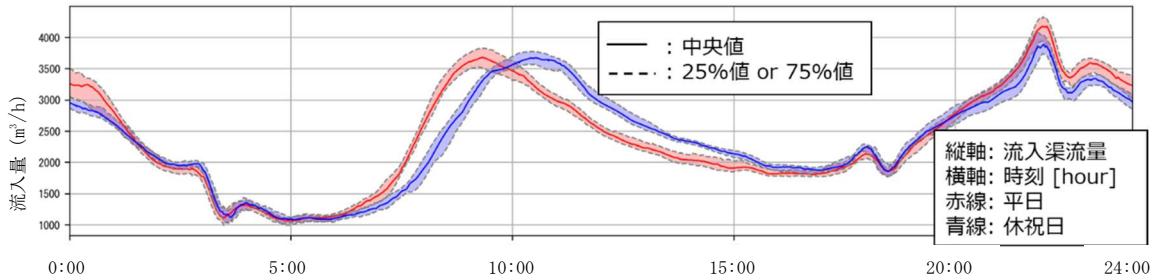


図3-4 晴天時における流入量の時刻変動
(晴天時は時刻により流入量が決定されることが分かる)

浸入水割合の推定

浸入水割合は、雨天時の流量データより算出する。浸入水割合は(3)式で示される。

$$\text{浸入水割合} = \frac{\text{浸入水量}}{\text{降雨量総量}} = \frac{\text{実流量} - \text{晴天時汚水量}}{\text{降雨量総量}} \quad (3)$$

各降雨期間に対し、実証により得られた浸入水割合と降雨総量を図3-5に示す。降雨総量（縦軸）が低い場合、晴天時汚水量のずれの影響により浸入水割合がずれる傾向にあるが、降雨総量が高い場合、浸入水割合の一定性が確認できる。

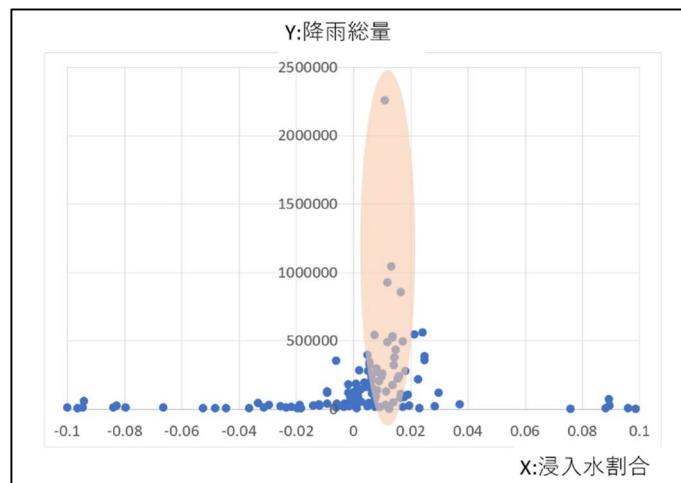


図3-5 降雨量総量と浸入水割合との関係

流出時間の推定

流出時間の設定 t_d においては、過去データに対し、流量の実測値と予測値の誤差が最も小さくなるように推定する。場外に流量計がある場合、流量計毎（エリア毎）に流出時間を算定することが可能である。

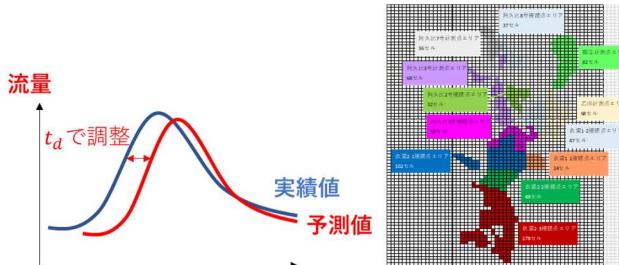


図3-6 流出時間 t_d の推定方法と、実証にて作成した流出時間設定マップ

パラメータの補正（粒子フィルタ）

上述のタイムエリア法に加え、各パラメータの補正には、粒子フィルタを用いた。粒子フィルタとは、複数の補正係数を作成したのちに計測値誤差（観測値と予測値との差分）を用いた尤度（ゆうど）計算を行い、また尤度に基づいたリサンプリングを行うことで、より精度の良い係数分布を作成する（最も確からしいパラメータ【浸入水割合、時間遅れ】を推定する）ものである。

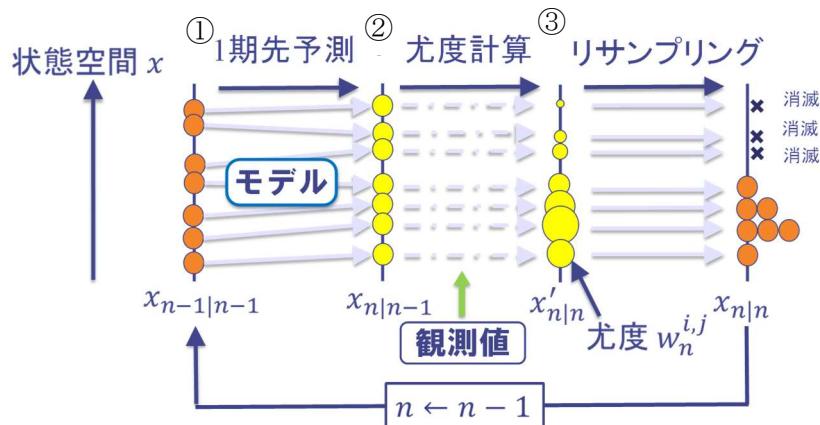


図3-7 粒子フィルタの概念図

粒子フィルタの簡単な考え方

- ① 複数のパラメータ（流出時間、浸入水割合など）集合【粒子】を準備し、それぞれの粒子で流入量予測を実施する。
- ② 得られた流入量予測値と観測値（流入量実績値）を比較し、各粒子に対する尤度（もっともらしさ）を計算する。（図中では尤度が高い粒子【パラメータ】を大きな円で記載）
- ③ 尤度の小さな粒子は消滅させる（もっともらしさが低いパラメータは除外させる）。尤度の高い粒子の近くに多くの粒子（パラメータ集合）を再度作成し、①からの計算を繰り返す。

継続的に①～③を繰り返すことで、実績値と予測値を比較することができ、誤差量の小さな流入量予測になるパラメータ（流出時間、浸入水割合など）となるように補正することができる。

§ 16. 水質予測技術の設計

本技術では、水質予測技術として活性汚泥モデル（ASM）を採用している。設計手法に関しては要素技術ごとに解説する。

【解説】

本技術では、水質予測技術として活性汚泥モデル（ASM）を採用している。ASMとは、IWA（国際水協会）の中に設置された「生物学的廃水処理の設計および運転を支援するための数学モデルに関するタスクグループ」が提案した活性汚泥モデルの数学モデルである。活性汚泥モデルは4種類のモデルが提案されており、それぞれ活性汚泥モデルNo. 1、2、2d、3と命名されている。現在では、活性汚泥プロセスにおける有機物・窒素・リン除去反応を記述するモデルの世界標準として、国際的にも認知されている。本研究では、有機物・窒素・リンを全て除去する高度処理の機場にも適用可能なASM2dを採用した。

ASM2dではCOD、窒素、リンに対し、化学反応・発酵などのプロセスを考慮した収支モデル（図3-8）を構築し、各反応を考慮したうえで、放流水質を予測する。ASMは、基本的に活性汚泥法の中で増殖する微生物の増殖モデルの形をとっており、増殖や加水分解などの反応により、各物質がどのように変化するかが記載されている。具体的には、汚濁物質（有機物・窒素・リン）が微生物の増殖のための基質として利用された結果として排水中のそれらの除去が進行するという増殖反応を数学的に記述するにあたり、反応の進行に伴う物質の形態変化の量的な関係（すなわち化学量論）の記述と、その反応の進行速度（速度論または動力学）を記述したものである⁶⁾。

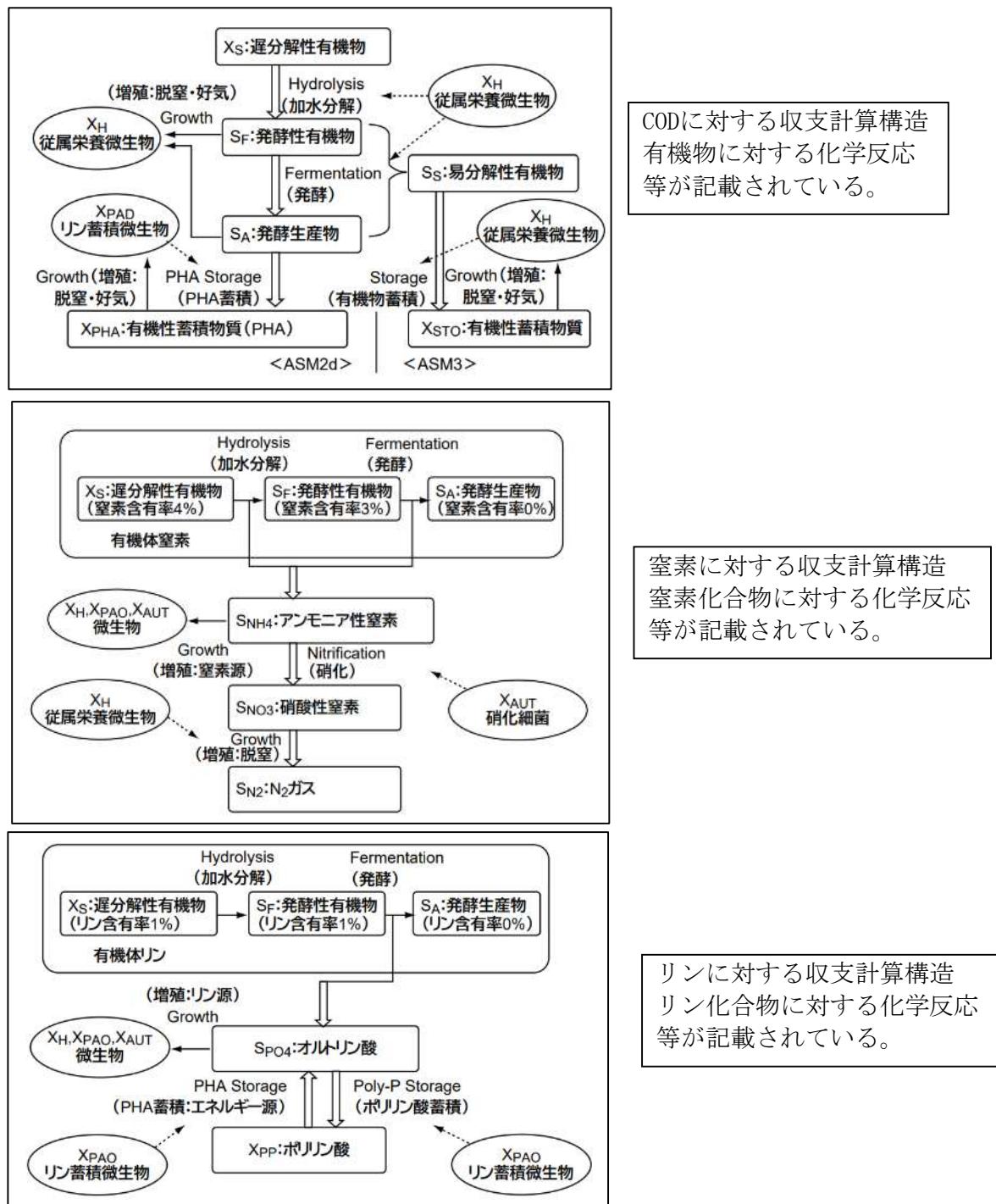


図3-8 ASMによるCOD（上図）、窒素（中央図）、リン（下図）の収支計算構造

また、反応槽での挙動を解析するため、簡易な槽列モデルを構築する。実証で構築した槽列モデルを図3-9に示す。なお、「下水道維持管理指針 実務編-2014年版-」によれば、流入水量に対する実用的な循環率は200%（硝化液循環 150%、返送汚泥 50%）程度とされている。しかし実際には、機場ごとに必要とされる窒素除去率やポンプのランニングコスト等を勘案して、循環比率が変更されることがあるため、対象とする機場の実態に即した循環比を設定する必要がある。

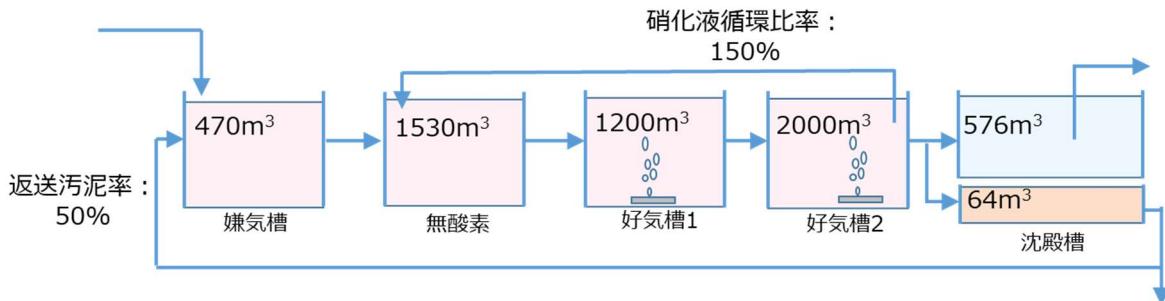


図3-9 実証事業で構築した槽列モデル

構築した槽列モデルに対し、ASM2dを用いた水質計算を行い、放流水質を予測する。ASM2dで必要なパラメータは表3.6の通りで、機場ごとにパラメータの調整が必要となる。だが、ほぼすべてのパラメータは文献値で決定され、水質実績データから赤枠部のパラメータを調整することが多い。

放流水NH₄-N濃度が実績データと異なる場合は μ_{AUT} 、 b_{AUT} を調整する。ASM2dでの計算値が実測値よりも大きい場合、 μ_{AUT} の値を大きくすることで硝化菌増殖速度が増加し、NH₄-N濃度の計算値が小さくなる。 μ_{AUT} の調整のみではNH₄-N濃度を実測値まで小さくできない場合は b_{AUT} の値を小さくする。逆に、ASM2dでの計算値が実測値よりも小さい場合、 μ_{AUT} の値を小さくし、それでも実測値を再現できない場合は b_{AUT} の値を大きくする。なお μ_{AUT} 、 b_{AUT} の値はそれぞれ0.35~1/d、0.05~0.15/dの範囲で調整するのが望ましい。

放流水TP濃度が実測データと異なる場合は q_{PHA} 、 q_{pp} を調整する。生物学的リン除去は嫌気槽でのリン吐き出しと、好気槽でのリン吸収の2つの反応機構に基づくため、実測値を再現できない原因がリンの吐き出しと吸収のどちらであるかによって対応が異なる。ASM2dの計算結果において嫌気槽でのリン吐き出しが不十分である（嫌気槽でのPO₄-P濃度が実測値を下回る）場合には、 q_{PHA} の値を大きくし、逆に嫌気槽でのリン吐き出しが過剰である（嫌気槽でのPO₄-P濃度が実測値を上回る）場合には q_{PHA} の値を小さくする。また、好気槽でのリンの吸収が不十分である（好気槽末端でのPO₄-P濃度が実測値を上回る）場合には、 q_{pp} を大きくし、逆に好気槽でのリン吸収が過剰である（好気槽でのPO₄-P濃度が実測値を下回る）場合には q_{pp} の値を小さくする。なお q_{PHA} 、 q_{pp} の値はそれぞれ2~3/d、1~1.5/dの範囲で調整するのが望ましい。

表3.6 ASM2dで必要なパラメータ
(水質予測のために調整必要なパラメータは赤枠で囲っている)

項目	内容	典型的な例
加水分解 : X_S		
K_h	X_S の最大比加水分解速度	3.00 [/d]
η_{NO3}	無酸素条件下での X_S の加水分解減少係数	0.60 [-]
η_{fe}	嫌気性条件下での X_S の加水分解速度減少係数	0.40 [-]
K_{O2}	S_{O2} に対する飽和・阻害定数	0.20 [gO2/m3]
K_{NO3}	S_{NO3} に対する飽和定数	0.50 [gN/m3]
K_X	X_S の加水分解における X_S/X_H に対する飽和定数	0.10 [gXs/gXh]
従属栄養生物 : X_H		
μ_H	X_H 最大比増殖速度	6.00 [/d]
q_{fe}	X_H による最大比発酵速度	3.00 [gXs / (gXh · d)]
η_{NO3}	X_H の無酸素条件下での増殖 (脱窒) における増殖速度減少係数	0.80 [-]
b_H	X_H の比自己分解速度	0.40 [/d]
K_{O2}	S_{O2} に対する飽和・阻害定数	0.20 [gO2/m3]
K_F	X_H の増殖における S_A に対する飽和定数	4.00 [gCOD/m3]
K_{fe}	発酵における S_F に対する飽和定数	4.00 [gCOD/m3]
K_A	X_H の増殖における S_F に対する飽和定数	4.00 [gCOD/m3]
K_{NO3}	S_{NO3} に対する飽和・阻害定数	0.50 [gN/m3]
K_{NH4}	S_{NH4} に対する飽和定数	0.05 [gN/m3]
K_P	S_{PO4} に対する飽和定数	0.01 [gN/m3]
K_{ALK}	S_{ALK} に対する飽和定数	0.10 [moleHCO3-/m3]
リン蓄積生物 : X_{PAO}		
q_{PHA}	X_{PHA} の最大比貯蔵速度	3.00 [gXpha / (gXpao · d)]
q_{pp}	X_{pp} の最大比貯蔵速度	1.50 [gXpp / (gXpao · d)]
μ_{PAO}	X_{PAO} の最大比増殖速度	1.00 [/d]
η_{NO3}	X_{PAO} の無酸素条件下での増殖 (脱窒) における増殖速度減少係数	0.60 [-]
b_{PAO}	X_{PAO} の比自己分解速度	0.20 [/d]
b_{PHA}	X_{PHA} の比自己分解速度	0.20 [/d]
K_{O2}	S_{O2} に対する飽和・阻害定数	0.20 [gO2/m3]
K_{NO3}	S_{NO3} に対する飽和・阻害定数	0.50 [gN/m3]
K_A	X_{PAO} の増殖における S_A に対する飽和定数	4.00 [gCOD/m3]
K_{NH4}	S_{NH4} に対する飽和定数	0.05 [gN/m3]
K_{PS}	X_{pp} の貯蔵における S_{PO4} に対する飽和定数	0.20 [gP/m3]
K_P	S_{PO4} に対する飽和定数	0.01 [gP/m3]
K_{ALK}	S_{ALK} に対する飽和定数	0.10 [moleHCO3-/m3]
K_{PP}	X_{pp}/X_{PAO} に対する飽和定数	0.01 [gXpp/gXpao]
K_{MAX}	X_{PAO} の最大ポリリン酸含有率	0.34 [gXpp/gXpao]
K_{IPP}	X_{pp} の貯蔵における阻害定数	0.02 [gXpp/gXpao]
K_{PHA}	X_{PHA}/X_{PAO} に対する飽和定数	0.01 [gXpha/gXpao]

硝化細菌 : X_{AUT}		
μ_{AUT}	X_{AUT} の最大比増殖速度	1.00 [/d]
b_{AUT}	X_{AUT} の比自己分解速度	0.15 [/d]
K_{O2}	S_{O2} に対する飽和・阻害定数	0.50 [gO ₂ /m ³]
K_{NH4}	S_{NH4} に対する飽和・阻害定数	1.00 [gN/m ³]
K_{ALK}	S_{ALK} に対する飽和定数	0.50 [moleHCO ₃ ⁻ /m ³]
K_P	S_{PO4} に対する飽和定数	0.01 [gP/m ³]
凝聚		
k_{PRE}	S_{PO4} 不溶化速度定数	1.00 [m ³ / (gFe(OH) ₃ · d)]
k_{RED}	X_{MeP} 不溶化速度定数	0.60 [/d]
K_{ALK}	X_{MeP} 可溶化における S_{ALK} に対する飽和定数	0.50 [moleHCO ₃ ⁻ /m ³]

モデルにおける量論係数の定義

項目	内容	典型的な例
窒素		
$i_{N,SI}$	S_I 中の窒素含有率	0.01 [gN/gCOD]
$i_{N,SF}$	S_F 中の窒素含有率	0.03 [gN/gCOD]
$i_{N,XI}$	X_I 中の窒素含有率	0.02 [gN/gCOD]
$i_{N,XS}$	X_S 中の窒素含有率	0.04 [gN/gCOD]
$i_{N,BM}$	生物 (X_H , X_{PAO} , X_{AUT}) 中の窒素含有率	0.07 [gN/gCOD]
リン		
$i_{P,SI}$	S_I 中のリン含有率	0.00 [gP/gCOD]
$i_{P,SF}$	S_F 中のリン含有率	0.01 [gP/gCOD]
$i_{P,XI}$	X_I 中のリン含有率	0.01 [gP/gCOD]
$i_{P,XS}$	X_S 中のリン含有率	0.01 [gP/gCOD]
$i_{P,BM}$	生物 (X_H , X_{PAO} , X_{AUT}) 中のリン含有率	0.02 [gP/gCOD]
浮遊物質		
$i_{TSS,XI}$	X_I 中のTSS当量	0.75 [gTSS/gCOD]
$i_{TSS,XS}$	X_S 中のTSS当量	0.75 [gTSS/gCOD]
$i_{TSS,BM}$	生物 (X_H , X_{PAO} , X_{AUT}) 中のTSS当量	0.90 [gTSS/gCOD]
加水分解		
f_{SI}	X_S が加水分解により S_I に変換される割合	0 [gCOD/gCOD]
従属栄養生物 : X_H		
Y_H	X_H の増殖収率	0.625 [gCOD/gCOD]
f_{XI}	X_H が自己分解により X_I に変換される割合	0.10 [gCOD/gCOD]
リン蓄積生物 : X_{PAO}		
Y_{PAO}	X_{PAO} の増殖収率	0.625 [gP/gCOD]
Y_{PO4}	X_{PAO} の貯蔵に必要な S_{PO4} 放出量	0.40 [gCOD/gCOD]
Y_{PHA}	X_{PAO} の貯蔵に必要な X_{PHA}	0.20 [gCOD/gCOD]
f_{XI}	X_{PAO} が自己分解により X_I に変換される割合	0.10 [gCOD/gN]
硝化細菌 : X_{AUT}		
Y_A	X_{AUT} の増殖収率 (S_{NO3} あたり)	0.24 [gCOD/gN]
f_{XI}	X_{AUT} が自己分解により X_I に変換される割合	0.10 [gCOD/gCOD]

§ 17. 汚泥界面予測技術の設計

下水処理場内の最終沈殿池での汚泥粒子のモデル化に広く採用されているVesilindモデルを採用している。設計手法に関しては要素技術ごとに解説する。

【解説】

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汚水内から活性汚泥を除去する役割を持つ。最終沈殿池に送り込まれる水の中には、反応槽内で有機物等を分解・除去する役割を果たした活性汚泥が含まれている。重力沈降の働きにより上部より「上澄み」、下部（通常ピットと呼ばれる）より「濃縮汚泥」として分離される。

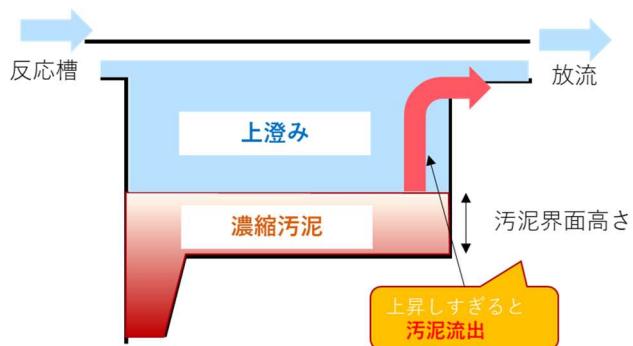


図3-10 最終沈殿池の構造

今回、下水処理場内の最終沈殿池での汚泥粒子のモデル化に広く採用されている Vesilindモデルを採用した。最終沈殿池を上澄みからピットまで10層に分割した場合、各層間での物質移動は図3-11のように説明される。最終沈殿池のフィード部から導入された活性汚泥は水流に伴う流れと重力沈降に伴う流れにより各層を移動する。

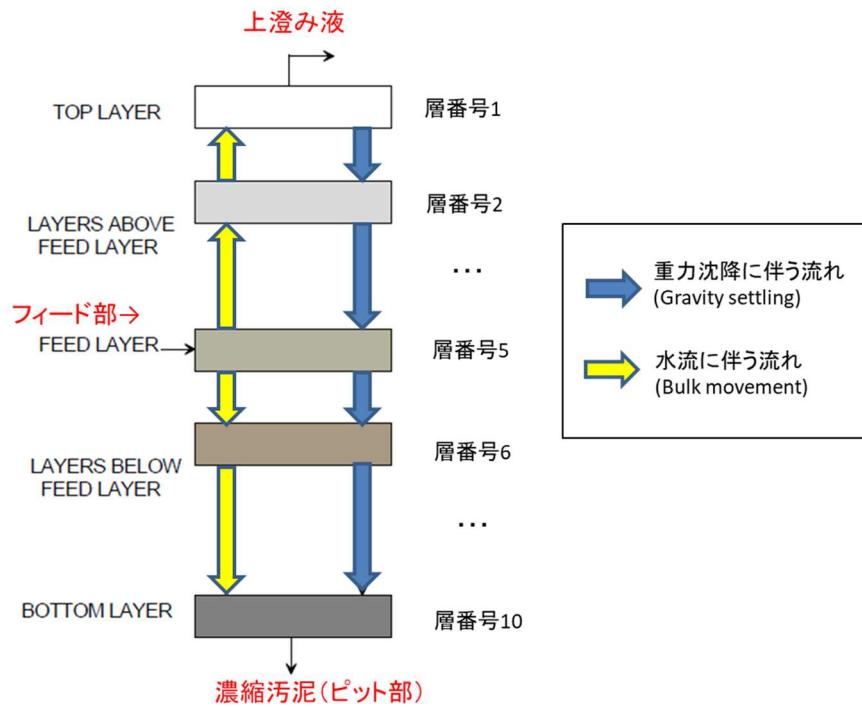


図3-12に各層間での物質収支の概要図を示す。

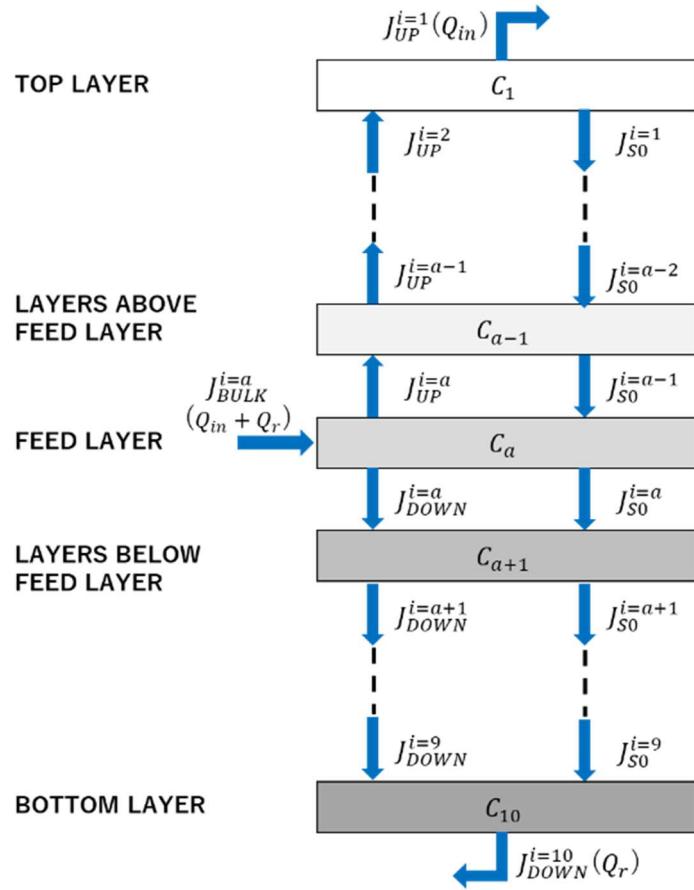


図3-12 各層間での物質収支概要図

各層間の水流に伴う流束を J_{BULK}^i [g-SS/m²/h]、各層間の重力沈降に伴う流束を J_S^i [g-SS/m²/s]、各層の汚泥粒子濃度 C_i [g-SS/m³]、各層の体積 V_i [m³]、水平断面積 A [m²]、下水処理場への流入流量 Q_{in} [m³/h] (=上澄み部からの流出量)、ピット部からの引き抜き流量 Q_r [m³/h]、最終沈殿池への流入水中の汚泥粒子濃度 C_{in} [g-SS/m³]、フィード層を a とすると、各層での物質収支は式(4)(5)で表わされる。式(4)(5)より、各層の汚泥粒子濃度の時間変化は、各層間の水流に伴う流束 J_{BULK}^i と重力沈降に伴う流束 J_S^i の収支より導かれる。

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = A \times (J_{BULK}^i - J_S^i) \quad i = 1 \sim a-1, a+1 \sim 10 \quad (4)$$

$$V_i \frac{dC_{i=a}}{dt} = (Q_{in} + Q_r)C_{in} + A \times (J_{BULK}^{i=a} - J_S^{i=a}) \quad (5)$$

次に、下水処理場への流入流量 Q_{in} [m³/h] (=上澄み部からの流出量)、ピット部からの引き抜き流量 Q_r [m³/h] とすると、フィード部 (第 a 層) の上層には水流の上昇に伴う流

束 J_{UP}^i 、フィード部の下層には水流の下降に伴う流束 J_{DOWN}^i が式(6) (7)で表される。これより、各層間の水流に伴う流束 J_{BULK}^i はフィード部(第*a*層)の上下で符号が変わり式(8) (9) (10)となる。

$$J_{UP}^i = \frac{Q_{in}}{A} \times C_i \quad i = 1 \sim a, \quad (6)$$

$$J_{DOWN}^i = \frac{Q_r}{A} \times C_i \quad i = a \sim 10, \quad (7)$$

$$J_{BULK}^i = J_{UP}^{i+1} - J_{UP}^i \quad i = 1 \sim a-1, \quad (8)$$

$$J_{BULK}^{i=a} = \frac{(Q_{in} + Q_r)}{A} \times C_{i=a} \quad (9)$$

$$J_{BULK}^i = -(J_{DOWN}^i - J_{DOWN}^{i-1}) \quad i = a+1 \sim 10 \quad (10)$$

重力沈降に伴う流束 J_{S0}^i は式(11)のように汚泥粒子濃度 C_i [g-SS/m³]に伴って変化する。これより、各層間における汚泥粒子の重力沈降に伴う流束 J_S^i は、式(12)で表される。

$$J_{S0}^i = C_i \times V_0 e^{-kC_i} \left(\frac{C_i}{K_S + C_i} \right) \quad (11)$$

$$J_S^i = J_{S0}^i - J_{S0}^{i-1} \quad (12)$$

ここで、 V_0 ：最大沈降速度[m/h]、 k ：沈降係数[m³/g-SS]、 K_S ：スイッチング因子[g-SS/m³]である。

最大沈降速度 V_0 と沈降係数 k は、汚泥粒子の沈降速度に影響のあるパラメータであり、測定可能な汚泥沈降性の指標であるSVI[mg/l]を用いて式(13) (14)で表される。最大沈降速度 V_0 と沈降係数 k を決定するSVIは、定期的に手分析で測定するSVI値の平均値を与える。

$$V_0 = \exp(2.605 - 0.00365 \times \text{SVI}) \quad (13)$$

$$k = 0.249 + 0.002191 \times \text{SVI} \quad (14)$$

(係数値は「活性汚泥のゾーン沈降速度とSVIの関係」

(小松ら、環境工学研究論文集 第39巻 2002) を参照)

スイッチング因子 K_S は、汚泥粒子濃度 C_i [g-SS/m³]が非常に低い領域での沈降速度を再現するための因子である。スイッチング因子 K_S はMLSSが低い沈殿槽上層での重力沈降現象を再現するための補正係数であり、 K_S が大きいほど、上層での沈降速度が小さくなり、汚泥界面のシミュレーション値が上昇する。スイッチング因子は、汚泥界面の実測データに合わせて、10-1000 [g-SS/m³]の範囲で汚泥界面の挙動が実測値と合うように調整を行う。

§ 18. 運転パターン分類の設計

本技術は、監視制御システムに蓄積された水位、揚水量、流入量、雨量、水質など揚水泵ポンプ運転に関する信号の計測データを、プラント状態に順次分類し、運転パターンを分類する。

【解説】

本技術は、監視制御システムに蓄積された過去4ヶ月またはそれ以上の期間の水位、揚水量、流入量、雨量、水質など揚水泵ポンプ運転に関する信号の計測データを、k-means法と呼ばれる数値分類法にてプラント状態に順次分類し、プラント状態の出現パターンすなわち運転パターンを分類する。各運転パターンの特徴を抽出し、操作員がどのような状況でどのような運転をしているかを分析する。運転パターン分類を適用する理由としては以下2点である。

- (ア) 蓄積された計測データから運転パターンを抽出することができ、「オペレータが何を理由に運転判断しているか」を類推することが可能
- (イ) 事前に運転パターンを分類し、パターンごとの流入量に対して最適化計算を実施することで、現地での計算負荷を低減

図3-13に分類したグラフの一例を示す。各色は分類されたプラント状態を示している。晴天時のデータを確認すると、各日、同じ時刻に同じ色（プラント状態）が出現していることが確認される。本技術の詳細は資料編6に記載する。

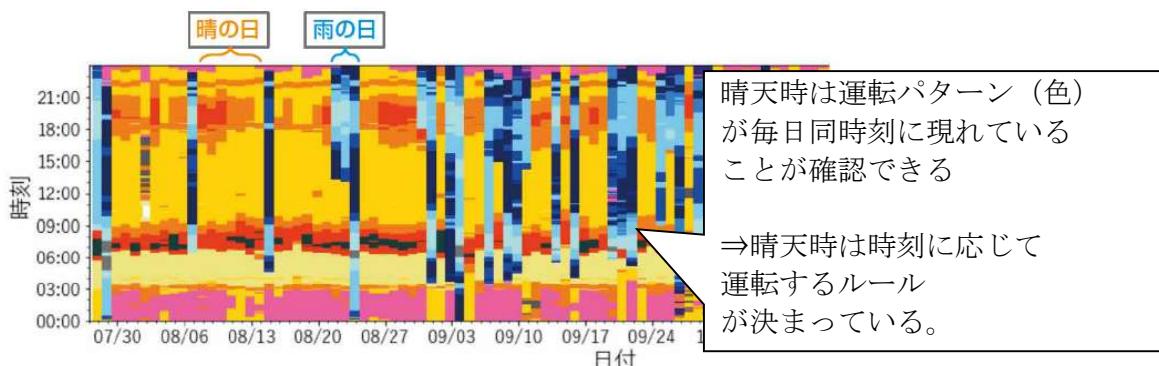


図3-13 運転パターン分類の解析結果例（色はプラント状態を示す）

表3.7 運転パターン分類の解析結果例におけるプラント状態（凡例）

ポンプ井 水位 > 4.2[m]	雨量 > 1.25[mm]	流入渠水 位 > 3.0[m]	揚水量 > 2891[m³/h]	■
			揚水量 <= 2891[m³/h]	■
		流入渠水 位 <=3.0[m]	流入量 > 1539[m³/h]	■
			流入量 <=1539[m³/h]	■
		ポンプ井水位 > 4.47[m]	ポンプ井水位 > 4.47[m]	■
			ポンプ井水位 <=4.47[m]	■
	雨量 <=1.25[mm]	流入渠水 位 > 3.0[m]	揚水量 > 2891[m³/h]	■
			揚水量 <= 2891[m³/h]	■
		流入渠水 位 <=3.0[m]	流入量 > 1537[m³/h]	■
			流入量 <= 1537[m³/h]	■
ポンプ井 水位 <=4.2[m]	雨量 > 1.25[mm]	流入渠水 位 > 3.0[m]	流入量 > 4010[m³/h]	■
		流入渠水 位 > 1.2[m]	流入量 <= 4010[m³/h]	■
		流入渠水 位 <=1.2[m]		■
		流入渠水 位 > 3.0[m]		■
		流入渠水 位 > 1.2[m]		■
	雨量 <=1.25[mm]	流入渠水 位 > 3.0[m]	揚水量 > 1596[m³/h]	■
			揚水量 <= 1596[m³/h]	■

§ 19. 多目的最適化の設計

多目的最適化の概要、原理を説明する。

【解説】

本項では多目的最適化の概要、原理を説明する。揚水パターンに関しては「過去計測データによる流入パターン」に加え、過去実績のない流入があった場合にも対応できるようするため、「想定降雨の流入パターン」を仮想的に作成する。まず過去の実績に基づいて、降雨の影響による流入の総量および流入時間を複数想定し、それらを組み合わせた降雨の影響による流入データを作成する。次に作成した各流入データを、通常時の平均流入データと足し合わせて作成する。

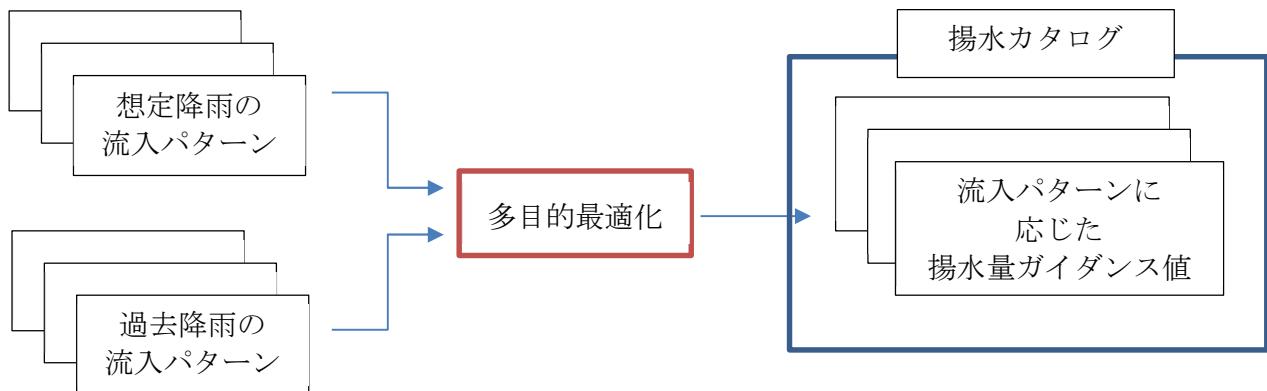


図3-14 多目的最適化による計算フロー

多目的最適化については、NSGAII: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm を使用する。これは遺伝的アルゴリズムベースの多目的最適化手法であり、目的関数が多すぎない場合に有効な手法と言われており、多様な解が出るように探索方法が工夫されている手法である。これにより極端に水位やコストを優先した揚水量の解や、それぞれの目的のバランスをとった揚水量の解が出力されるようになる。

最適化する上で、内部では物理モデルによる演算を行う。 $x(t)$ は管内貯留量、 $u(t)$ は揚水量、 $w(t)$ は流入量である。 $y_1(t)$ は流入渠水位であり、 $y_2(t)$ は揚水ポンプ電力である。 $waterstorage2waterlevel$ は管内貯留量と流入渠水位の変換式であり、 $pump2electric$ は揚水量とポンプ電力の変換式である。 f_{COD}, f_{TN}, f_{TP} はそれぞれCOD, TN, TPの濃度を導出するモデルである。水質総量に関しては、1日ごとの値を取得する。(午前1時から翌午前1時までの総量が入力される。時間毎の濃度×時間毎の揚水量(平均値)を行い計算する。分母の値はCOD, TN, TPそれぞれの総量値である。)契約電力量値については、 $Demand(u(t))$ とともに計算する。

管内貯留量の変動値は以下のように記載される。

$$\dot{x}_1(t) = -u(t) + w(t)$$

流入渠水位は以下のように記載される。

$$y_1(t) = \text{waterstorage2waterlevel}(x(t))$$

ポンプ電力は以下のように記載される。

$$y_2(t) = \text{pump2electric}(u(t))$$

*COD, TN, TP*の濃度はそれぞれ以下のように記載される。

$$\begin{aligned} COD(t) &= f_{COD}(COD_{ave}(t), u(t)) \\ TN(t) &= f_{TN}(TN_{ave}(t), u(t)) \\ TP(t) &= f_{TP}(TP_{ave}(t), u(t)) \end{aligned}$$

*COD, TN, TP*の総量値は \mathbb{N}_{1day} (午前1時から翌午前1時まで)それぞれ以下のように記載される。

$$\begin{aligned} COD\text{総量値} &= \left[\sum_{t \in \mathbb{N}_{1day}} COD(t) \times u(t) \right] \\ TN\text{総量値} &= \left[\sum_{t \in \mathbb{N}_{1day}} TN(t) \times u(t) \right] \\ TP\text{総量値} &= \left[\sum_{t \in \mathbb{N}_{1day}} TP(t) \times u(t) \right] \end{aligned}$$

総量値の指標値である総量規制値に対する割合は以下のように記載される。

$$Q_{total} = \max \left(\max \left(\frac{COD\text{総量値}}{COD\text{総量規制値}}, \frac{TN\text{総量値}}{TN\text{総量規制値}}, \frac{TP\text{総量値}}{TP\text{総量規制値}} \right) \right)$$

ただし、 $COD\text{総量規制値} = 1692[kg]$, $TN\text{総量規制値} = 1399[kg]$, $TP\text{総量規制値} = 84.6[kg]$ である。

次に多目的最適化における目的関数について説明する。本実証では3種類の目的関数と5種類の制約関数により熟練者の考慮している事項を反映する。説明変数は3日間の揚水量 $X = [u(0) \cdots u(t) \cdots u(n)]^T$ となり、多目的最適化の問題として $F(X) = [f_1(X) f_2(X) f_3(X)]^T$ の最小化問題となる。

目的関数はそれぞれ f_1 ：浸水リスク回避【水位の関数】、 f_2 ：コスト削減【電力の関数】、 f_3 ：放流水質確保【放流水質濃度と放流水質総量の関数】であり、以下のように記載される。

$$\begin{aligned} f_1 &= \text{mean} \left(\left(\frac{y_1 - \text{最低基準水位}}{\text{通常値水位幅}} \right)^2 \right), 0 \leq t < T \\ f_2 &= \text{mean}(y_2[kW]), 0 \leq t < T \end{aligned}$$

$$f_3 = \max \left(\max \left(\frac{COD(t)}{CODのC値管理値}, \frac{TN(t)}{TNのC値管理値}, \frac{TP(t)}{TPのC値管理値} \right), 0 \leq t < T \right) + Q_{Total}$$

ただし、最低基準水位は理想水位の2[m]とし、通常値水位幅は4[m], 2.3[m]の間であり、1.7[m]であり、CODのC値管理値 = $20 \left[\frac{mg}{L} \right]$, TNのC値管理値 = 16.5[mg/L], TPのC値管理値 = 1[mg/L]である。

制約関数 g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 は以下のように記載される。

$g_1 = y_1 <$ 第一次非常配備流入渠水位管理値, $0 \leq t < T$: 流入渠水位の制約

$g_2 = u(t) <$ 晴天時通常範囲最大揚水量, $0 \leq t < T$: 揚水量一段階目の制約

$g_3 = u(t) <$ 雨天時管理上限揚水量, $0 \leq t < T$: 揚水量二段階目の制約

$g_4 = Demand(u(t)) <$ 契約電力, $0 \leq t < T$: 契約電力以下にする制約

$g_5 = Q_{Total} <$ 雨天時水質総量値の管理基準値 : 総量規制値80%以下にする制約

今回の実証では、第一次非常配備流入渠水位管理値 = 5.8[m]であり、晴天時通常範囲最大揚水量 = $4000[m^3/h]$ 、雨天時管理上限揚水量 = $5000[m^3/h]$ 、契約電力 = $1990[kW]$

目的関数、制約関数中に記載された具体的な数値は実証に用いた具体的な数値であり、各処理場における具体的な数値は数値を変更することにより適用することができる。

第4章 維持管理

第1節 システムの保守、点検

§ 20. システムの保守、点検

本技術は、各種計測データを活用したシステムであり、正常稼働のために、システムの保守、点検を実施する必要がある。

【解説】

本システムは雨天時に動作が必要な装置であり、汎用パソコンを活用し、システム構築している。ハードウェアとしては汎用パソコンに準じた保守、点検を実施することが望ましい。**表4.1**にハードウェアとしての推奨点検項目を記載する。

表 4.1 ハードウェアの推奨点検

点検項目と内容	点検周期
1. 室温、湿気等の確認 2. 過熱、汚損、損傷、鏽の発生、異常音等の有無	1週間
1. ファンの状態の確認 2. モニターランプ等の状態 3. ケーブルの断線及びコネクター部の緩み	3か月
1. 裏面配線のほこり 2. 基板及び取付部品の状態 3. 機能動作の確認	1年
1. オーバーホール (一般的に汎用パソコンは5年に一度のオーバーホール 【各種部品交換】が推奨されている)	3～6年

また、ソフトウェアに関しても適切な保守を実施する必要がある。

① 情報伝達技術

降雨データ通信網を専用線・自営の通信網で構築する場合、保守が必要になる。

河川情報センターや広域ネットワークサービス会社の通信サービスを利用する場合にも、保守が必要となる。

② セキュリティ対策

データ通信網などをインターネットの公衆網で構築する場合、ウィルス対策ソフトウェアのパターンファイル更新やOSバージョンのアップデート等が必要となる。

③ データ管理

データ管理では、雨量データ、水位・流量データ等がデータベースに正常に蓄積されているか、確認を行う。

また、データの欠損が生じた場合には、故障内容に応じて担当者はデータ補填などの処置を行う必要がある。

本ガイダンスシステムが故障した際には、人為的な運転操作（経験に基づく運転操作）が必要となる、よって揚水量に応じた水位変動、水質変動などを本ガイダンスシステムにより把握し、人為的な運転操作も実施できるようにする必要がある。

第2節 対象施設、機器変更時の対応

§ 21. 対象施設、機器変更時の対応

本技術はデータを活用したシステムであり、対象施設、機器の変更によりモデルの見直しが必要となる。

【解説】

① 流入量予測技術の見直し

流入量予測技術は流域における汚水量・浸入水割合等により予測モデルの見直しが必要となる。些少のパラメータ修正（季節変動など）に関しては粒子フィルタを用いて補正されるため、問題ないが、「大規模工場新設」「流域拡大」等の大幅な汚水量見直しに対しては流入量予測モデルの見直しが必要となる。

② 水質予測技術の見直し

水質予測技術は水処理の方式変更（高度処理化など）や、プロワの運転手法見直し（DO一定制御からNH₄制御への変更）によりモデルを見直す必要がある。

③ 汚泥界面予測技術の見直し

汚泥界面予測技術はSVI等の沈降性パラメータの変動（高度処理化等の水処理方式変更）によりモデルを見直す必要がある。

④ 運転パターン分類・多目的最適化の見直し

運転パターン分類・多目的最適化技術は運転管理方式の変更や、管理基準値の見直しが発生する場合に、モデルの見直しを実施する必要がある。また、主ポンプ更新時は揚水量に対する電力量の対応関係が変動することから、電力値見直しが必要となる。

資 料 編

1. 実証概要	資-1
2. 実証結果（ガイダンス事例集）	資-5
3. 費用対効果算出ツールについて	資-20
4. セキュリティ対策	資-24
5. 実証設備操作説明資料	資-25
6. 運転パターン分類技術の詳細	資-33
7. 水質予測技術のその他処理方式への適用について	資-35
8. 参考文献	資-36
9. 問い合わせ先	資-37

資料編

1. 実証概要

令和3年度 B-DASH 事業のうち、分流式下水道の流入予測と運転支援技術について採択された本技術の概要を表資 1.1 に示す。

表資 1.1 実証研究概要

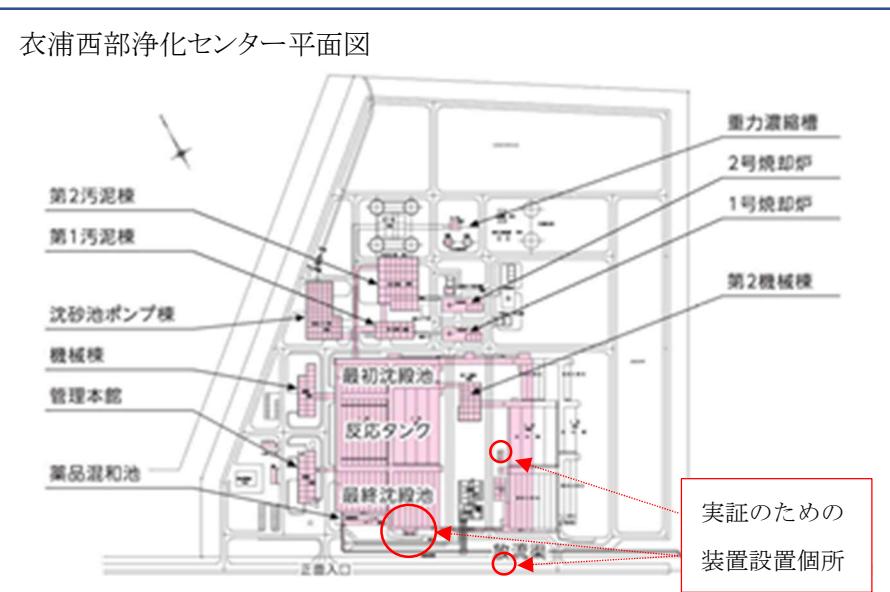
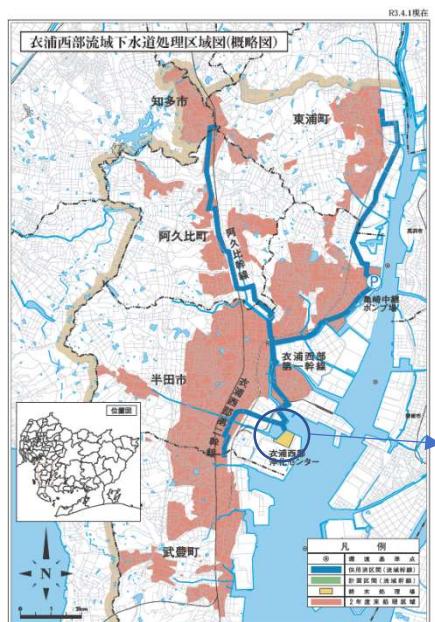
研究名称	AI を用いた分流式下水道における雨天時浸入水対策技術実証
実施期間	令和3年度、令和4年度
実施者	三菱電機(株)・(大)東京大学・(公財)愛知水と緑の公社・愛知県共同研究体
実証場所	愛知県衣浦西部浄化センター
実証技術	雨天時の運転員が考慮すべき目的（「浸水・溢水リスク低減」「放流水質の確保」「処理コストの低減」）をバランスよく実現するためにAI技術を適用する。
検証項目	「雨天時運転ガイダンス装置」を用いた運転操作により ①「浸水・溢水リスク低減」②「放流水質の確保」③「処理コストの低減」 が達成されていることを確認する。

1-1. 実証場所

今回、実証フィールドとして愛知県の衣浦西部浄化センターで実証事業を行っている。衣浦西部浄化センターの令和4年度段階における稼働状況を表資1.2に示し、位置図・平面図を図資1-1に示す。

表資1.2 衣浦西部浄化センター 稼働状況

排除方式	分流式下水道
現有処理能力	日最大 84,600m ³ /day
水処理法	1系：凝集剤添加活性汚泥法 2系：凝集剤添加嫌気無酸素好気法 3系：凝集剤添加3段ステップ流入式 硝化脱窒法
汚泥処理法	濃縮→脱水→焼却
放流先	衣浦港



図資1-1 衣浦西部浄化センターの位置図と平面図

衣浦西部浄化センターは伊勢湾に面する衣浦港に放流しており、総量規制が課せられている。水質基準に関する法令と衣浦西部浄化センターでの水質管理基準を表資 1.3 に示す。

表資 1.3 水質に関する法令基準と衣浦西部浄化センターでの水質目標値

（「愛知県第 8 次水質総量削減について」より作成）

	法令基準*1		衣浦西部浄化センターでの水質管理基準	
	水質汚濁防止法第 3 条 1 項	水質汚濁防止法第 4 条 5-1 (閉鎖性水域総量規制)	通常状態 (雨天影響なし)	第 1 次非常配備
BOD(mg/L)	160	—	—	—
COD(mg/L)	160	20	18.0	20.0
T-N(mg/L)	120	20	14.8	16.5
T-P(mg/L)	16	1.5	0.9	1.0
大腸菌群数 (個/cm ³)	3000	—	—	—

1-2. 実証スケジュール

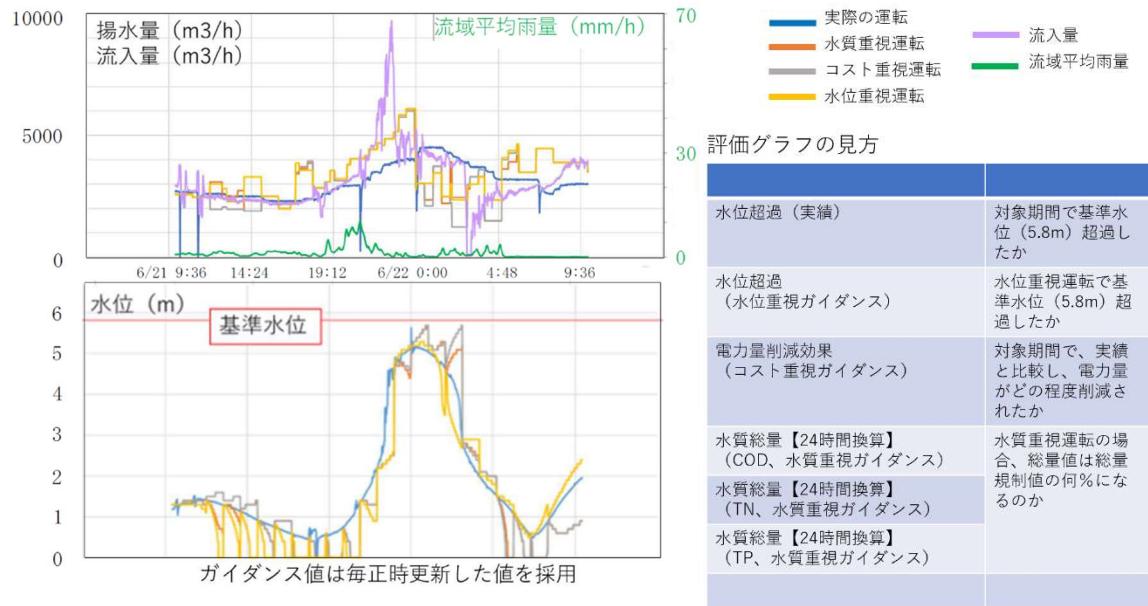
表資 1.4 に実証スケジュールを示す。令和3年度より実証研究に着手するとともに令和4年度は現地ガイダンスシステムの製作・設置を完了させた。令和4年度は現地にて本システムを運用開始し、データの確認評価などを実施した。

表資 1.4 実証スケジュール

	令和3年度				令和4年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
システム全体設計			➡					
プラント物理モデル構築			➡					
オフラインデータ分析			➡	➡	データ分析			
ガイダンスシステム構築			➡	➡	設計	製作	試験	
現地実証					操作説明	契約	オンライン実証	システム改良
							オンライン実証(改良)	

2. 実証結果（ガイダンス事例集）

今回の実証で得られたガイダンス事例集を本章で記載する。グラフ・表の見方は以下のとおりである。



図資 2-1 運転ガイダンスの例

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【オレンジ】、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ダンス値（水質重視【オレンジ】、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）：

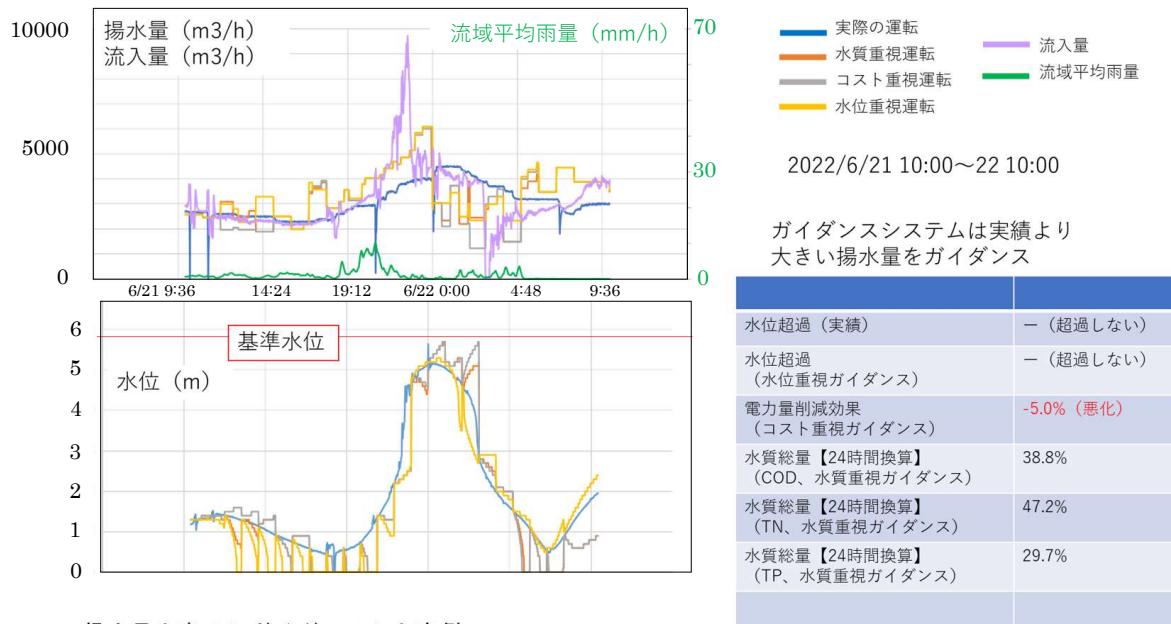
実際の運転に対して、コスト重視運転ガイダンスがどれだけ、電力量を削減できているかを示す。コスト重視運転ガイダンスが実際の電力量より大きくなる場合、本指標はマイナスとなる。

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%である。（雨天時運転目標は80%）

次ページ以降に特徴的な事例を紹介する。

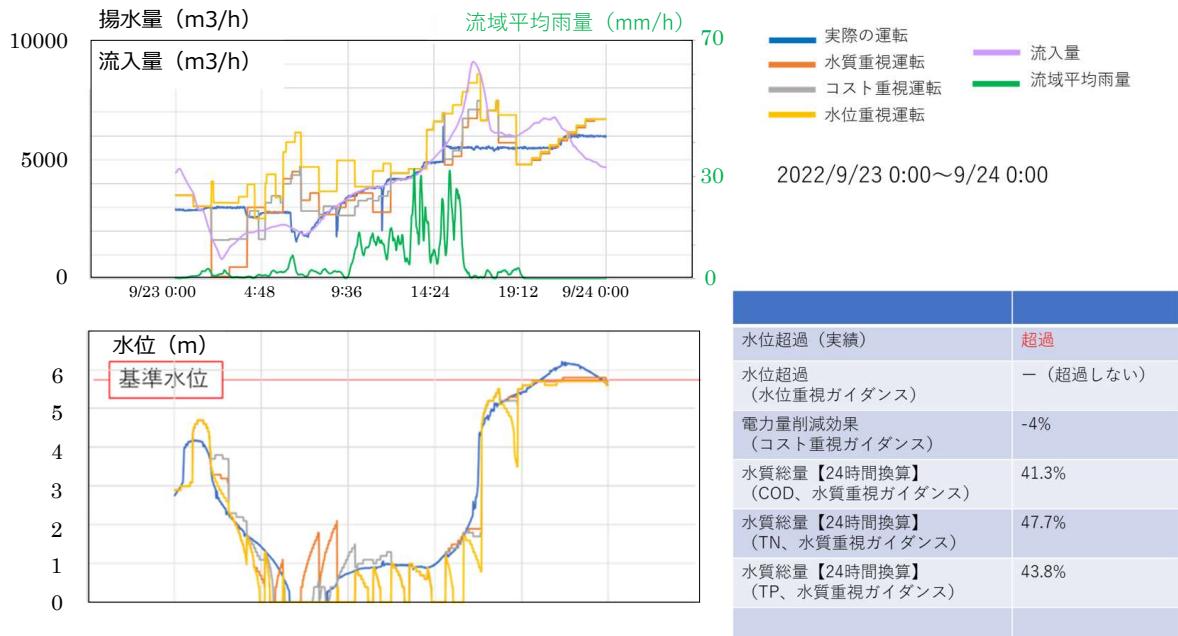
事例①（ガイダンスシステムが揚水量を大きめに提示した事例）



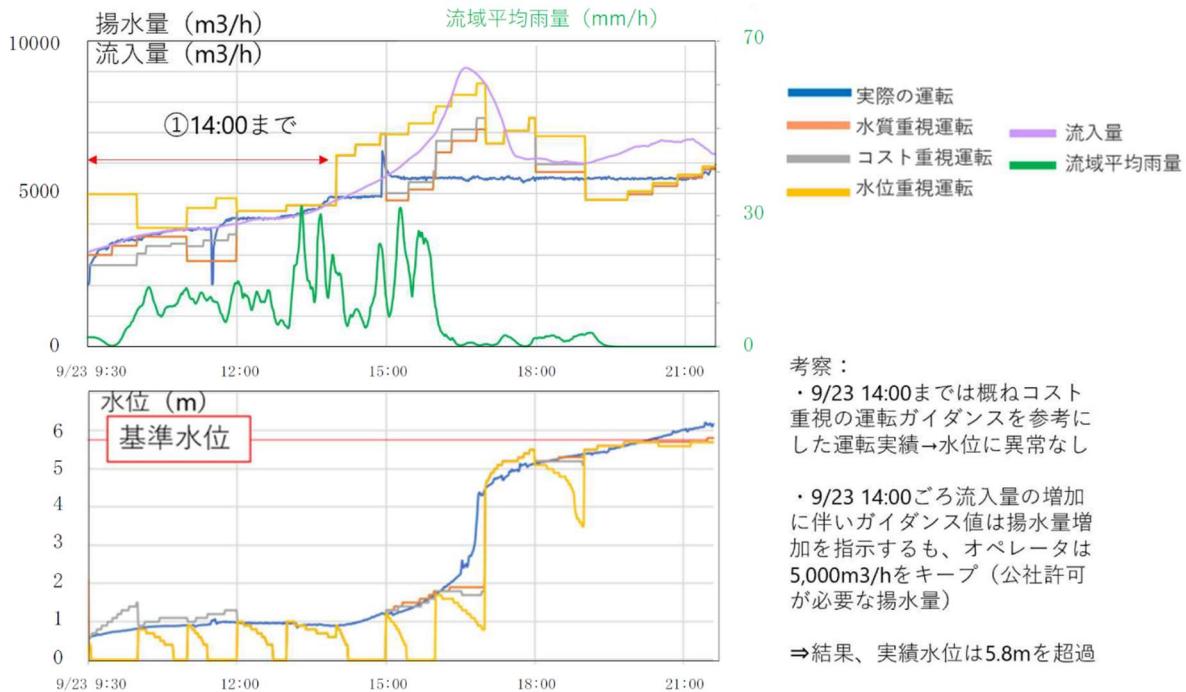
図資 2-2 運転ガイダンス事例①2022年6月21日

この事例における実際の運転（青線）では揚水量は $5,000\text{m}^3/\text{h}$ 以下で運転している。一方で運転ガイダンス値は流入量の急激な上昇（20:00 くらい）を検知し、実際の運転より大きめの揚水量をガイダンスしている。実際の運転でも基準水位は超過していないが、ガイダンスシステムは大きい揚水量をガイダンスしたため、コスト重視運転ガイダンス（グレー）における電力量削減効果は「悪化」を示している。

事例②（ガイダンス値に従えば、水位超過しなかった事例）



図資 2-3 運転ガイダンス事例②2022 年 9 月 23 日



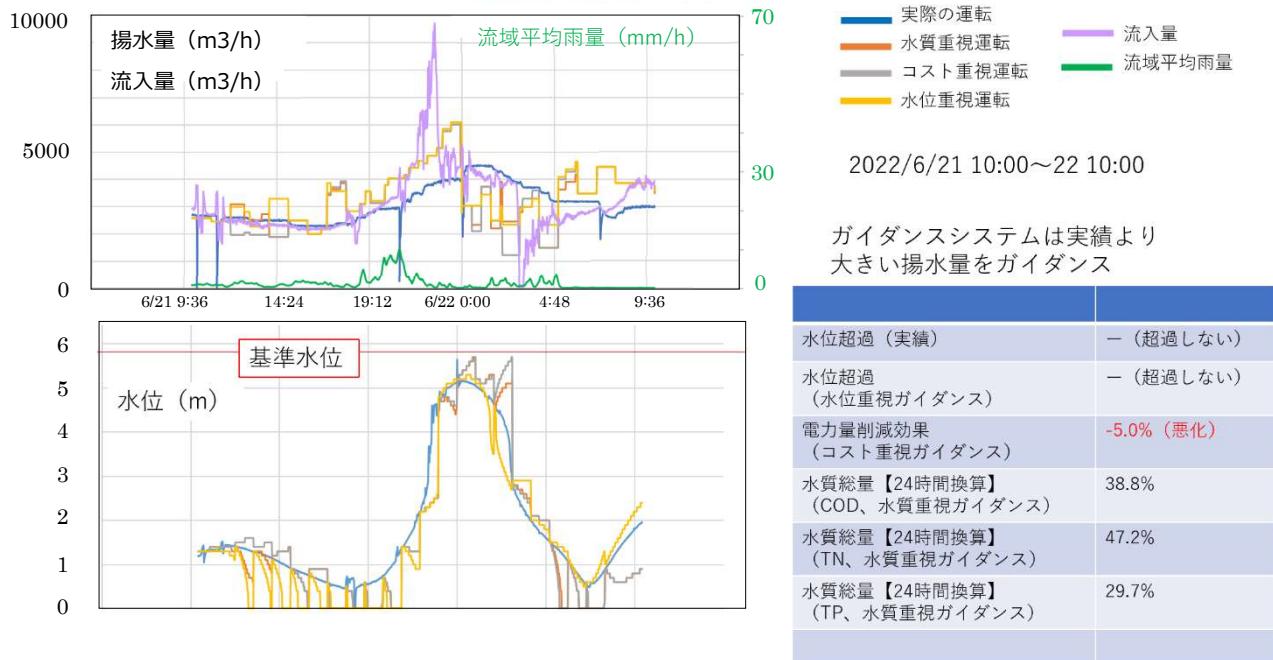
図資 2-4 運転ガイダンス事例②2022 年 9 月 23 日 9:30~21:30

この事例における実際の運転では 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。

本例に関して考察すべく9:00～21:00までを拡大した図が下図である。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以降の運転ガイダンスは流入量の増加を検知し（紫線）6,000m³/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5,000m³/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5,000m³/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5,000m³/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。

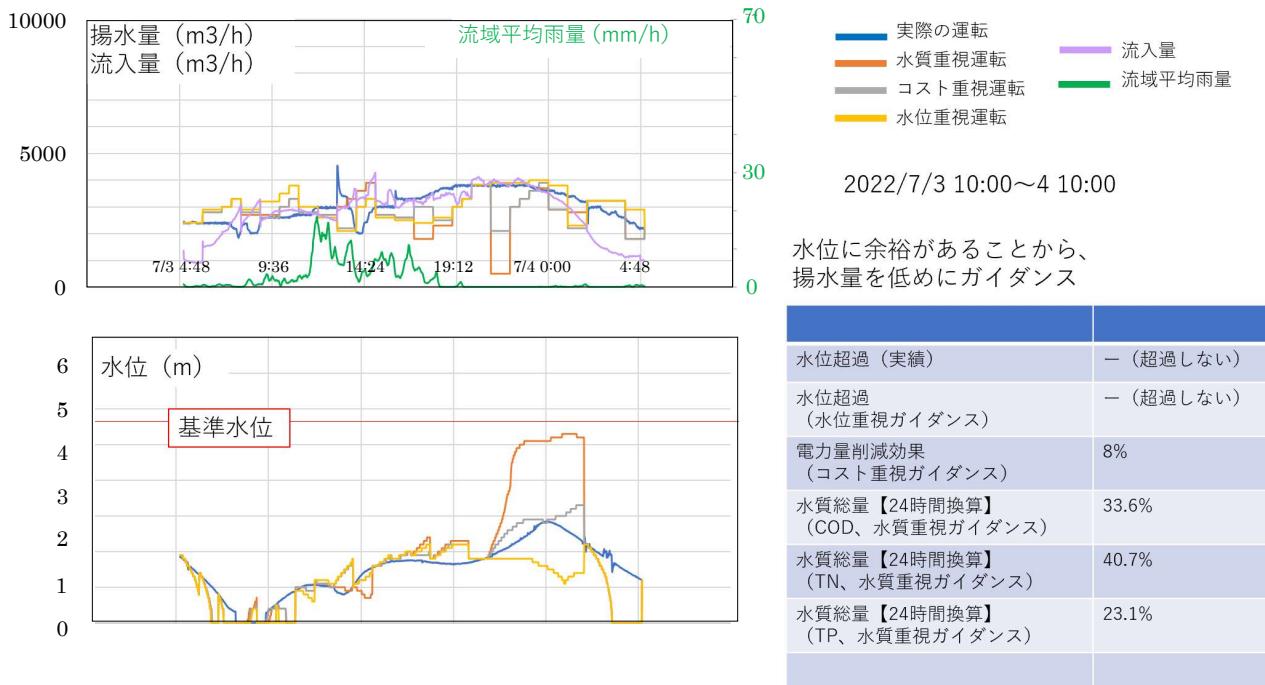
その他の実証データ事例を以下に示す。

2022/6/21の事例



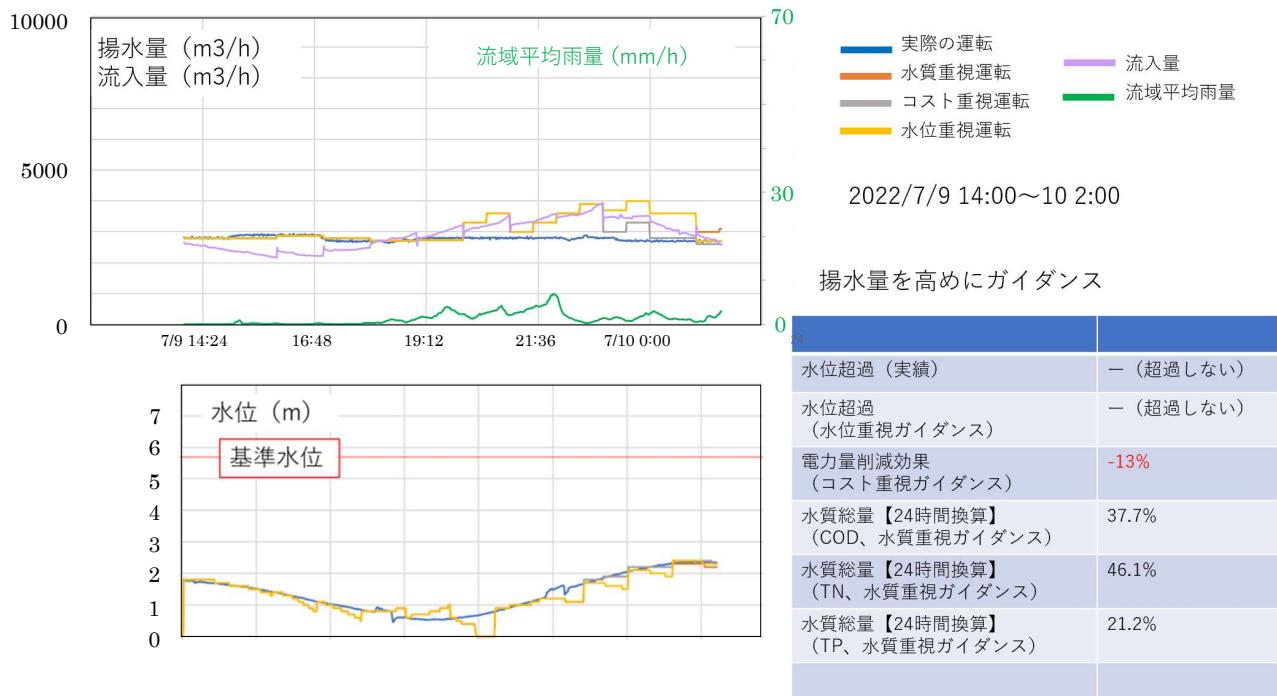
図資 2-5 運転ガイダンス事例①2022年6月21日

2022/7/3の事例



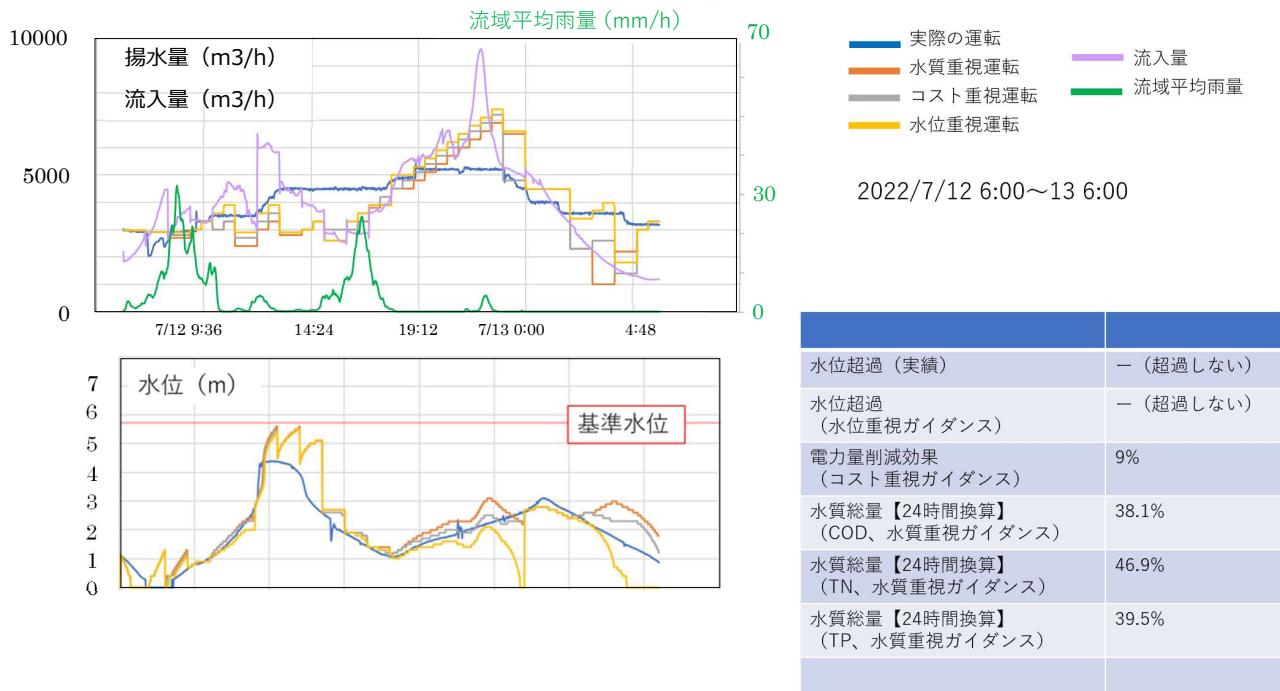
図資 2-6 運転ガイダンス事例②2022年7月3日

2022/7/9の事例



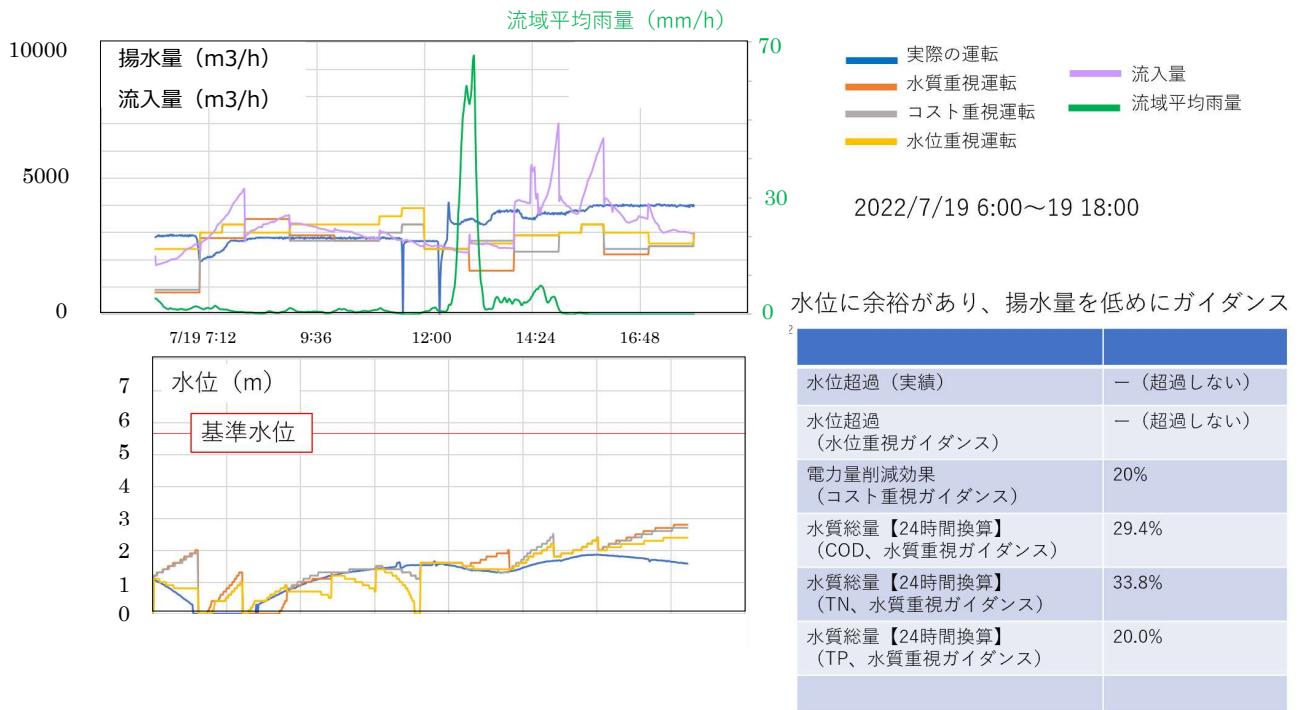
図資 2-7 運転ガイダンス事例③2022年7月9日

2022/7/12の事例



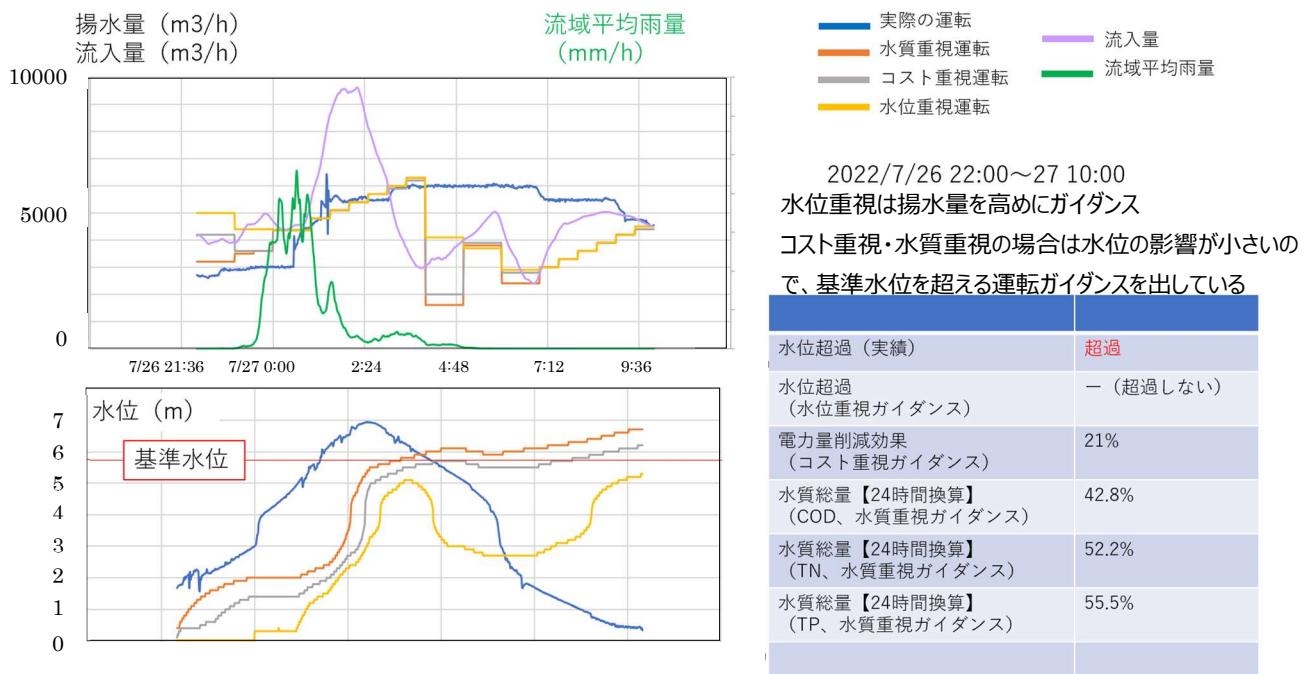
図資 2-8 運転ガイダンス事例④2022年7月12日

2022/7/19 の事例



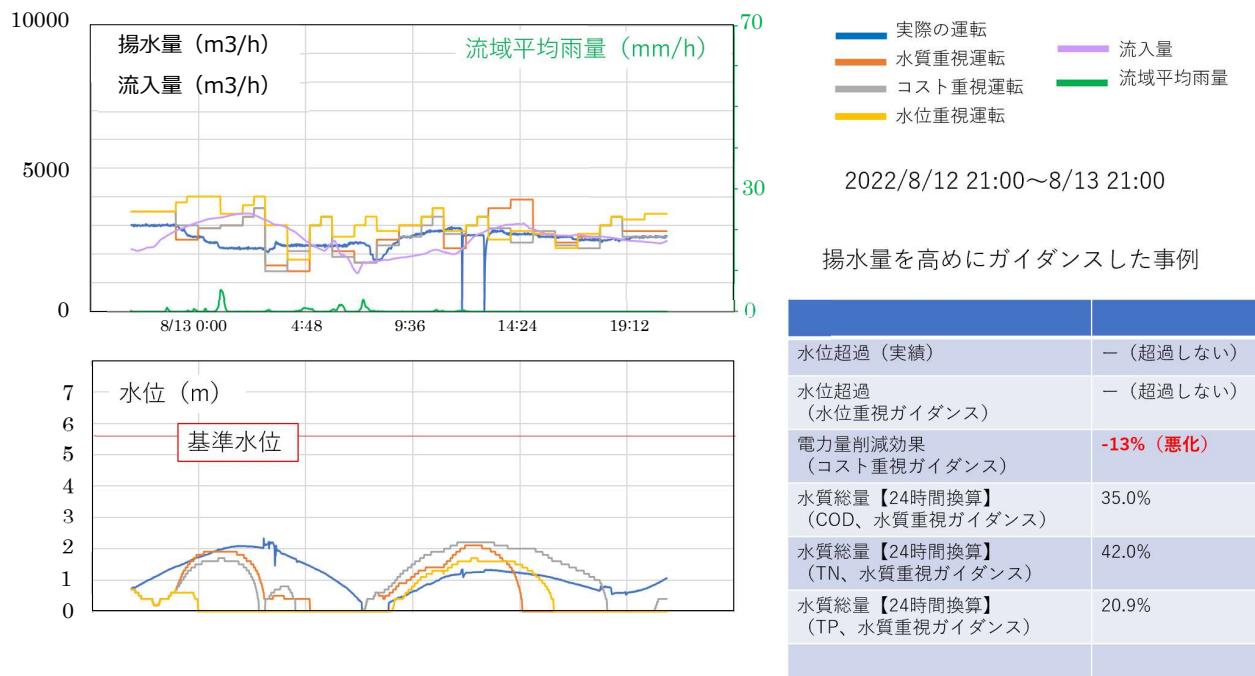
図資 2-9 運転ガイダンス事例⑤2022 年 7 月 19 日

2022/7/26の事例



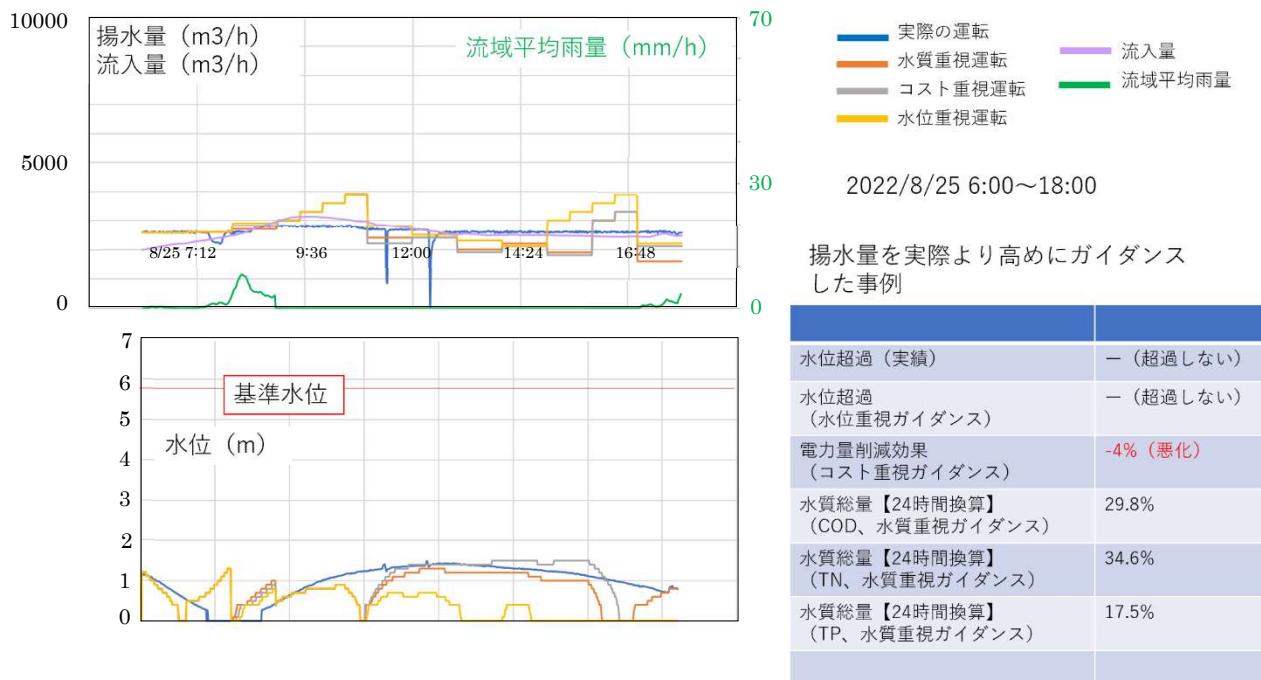
図資 2-10 運転ガイダンス事例⑥2022 年 7 月 26 日

2022/8/12の事例



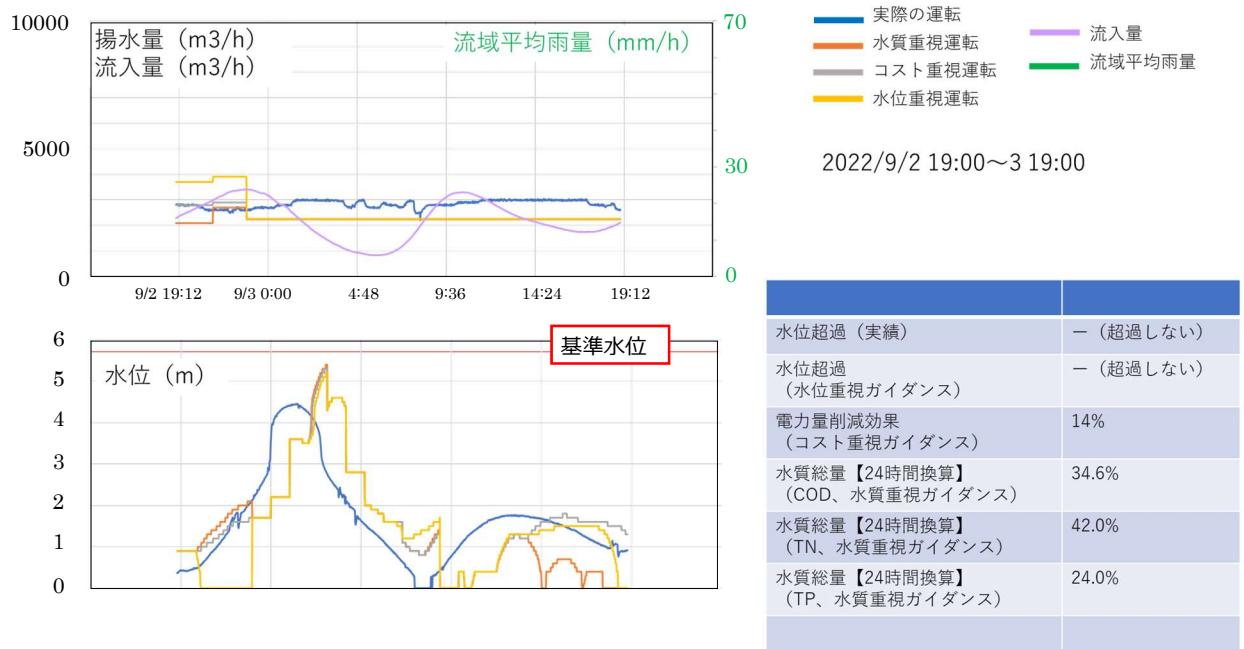
図資 2-11 運転ガイダンス事例⑦2022年8月12日

2022/8/25の事例



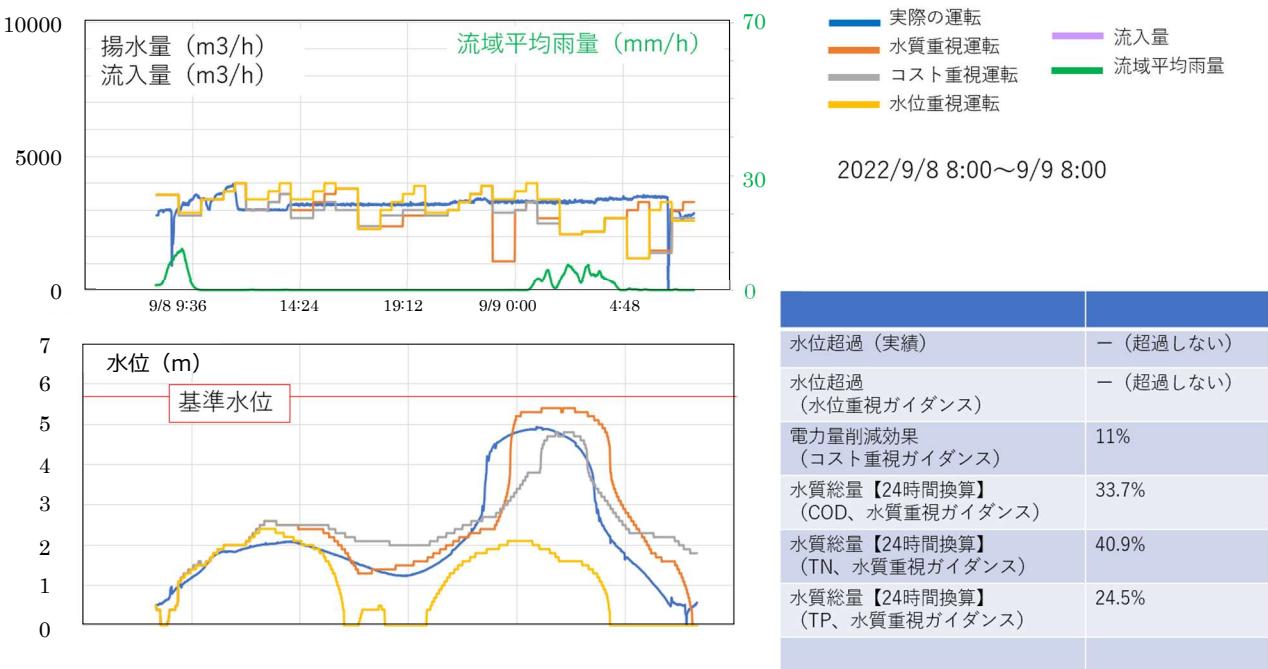
図資 2-12 運転ガイダンス事例⑧2022年8月25日

2022/9/2の事例



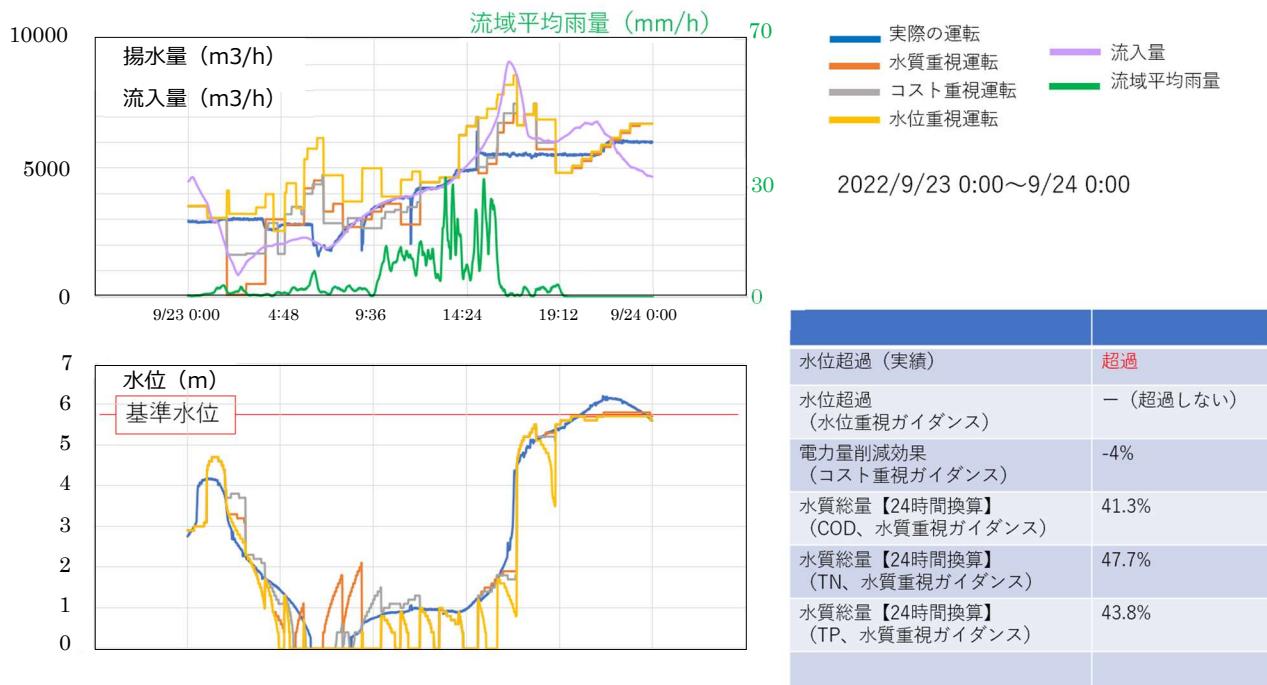
図資 2-13 運転ガイダンス事例⑨2022年9月2日

2022/9/8の事例



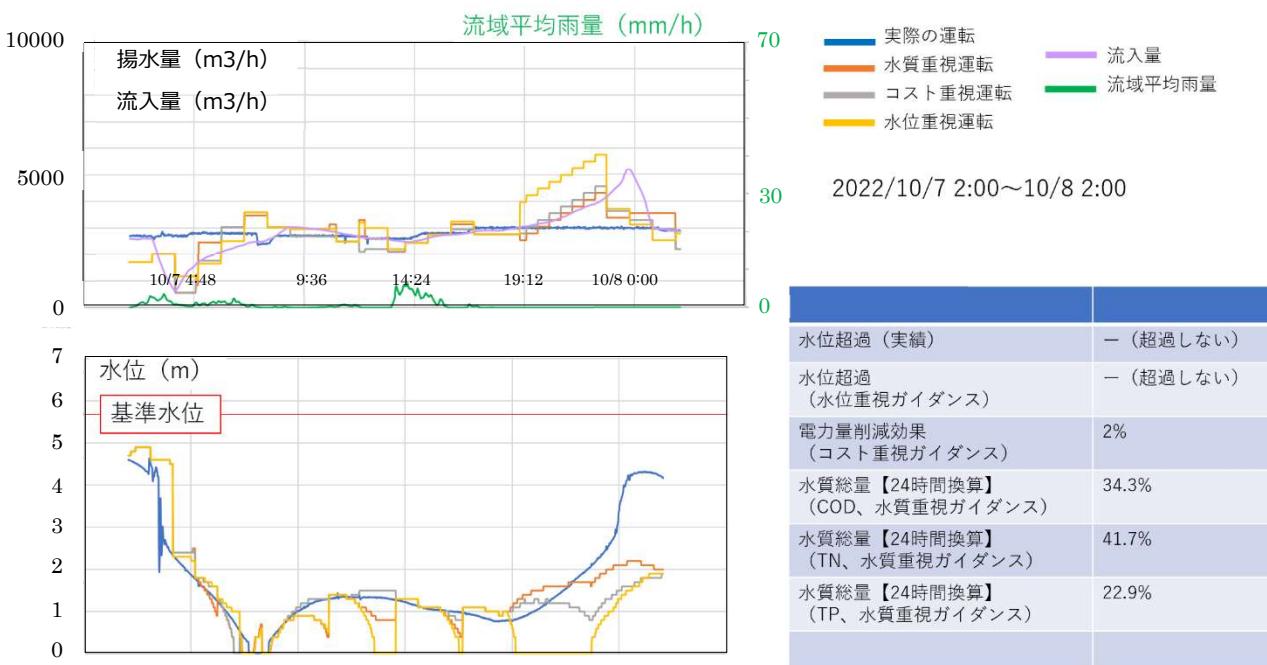
図資 2-14 運転ガイダンス事例⑩2022年9月8日

2022/9/23の事例



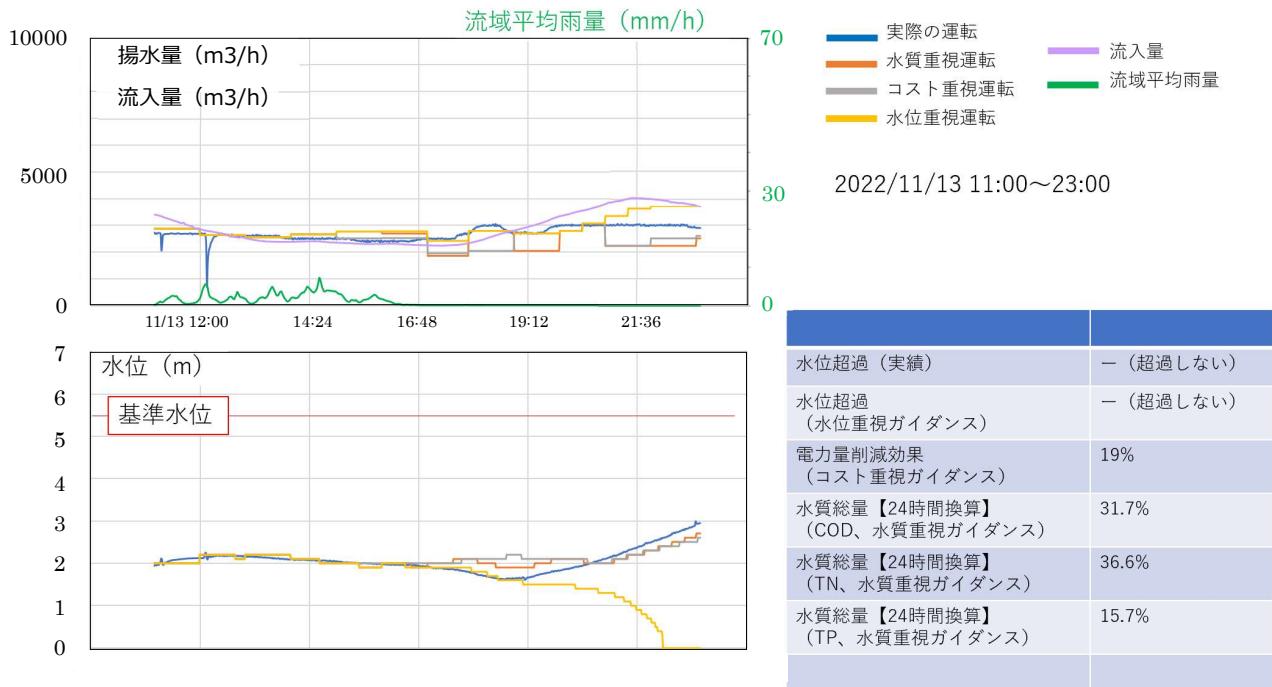
図資 2-15 運転ガイダンス事例⑪2022年9月23日

2022/10/7の事例



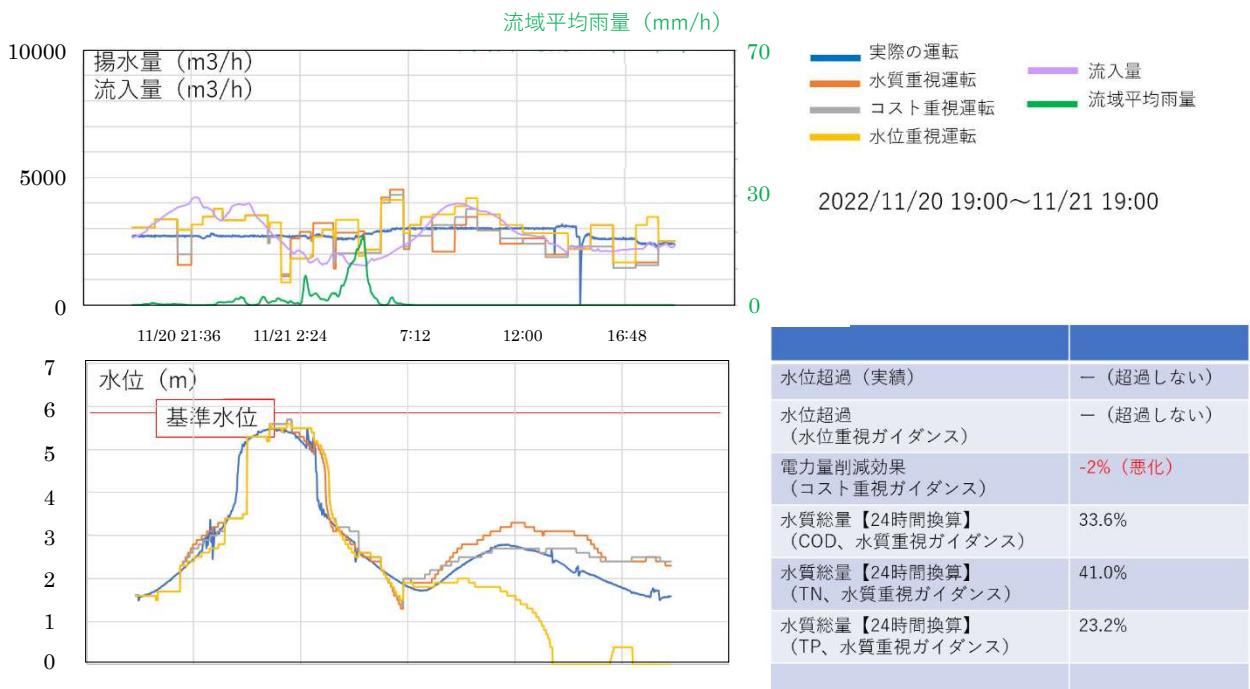
図資 2-16 運転ガイダンス事例⑫2022年10月7日

2022/11/13の事例



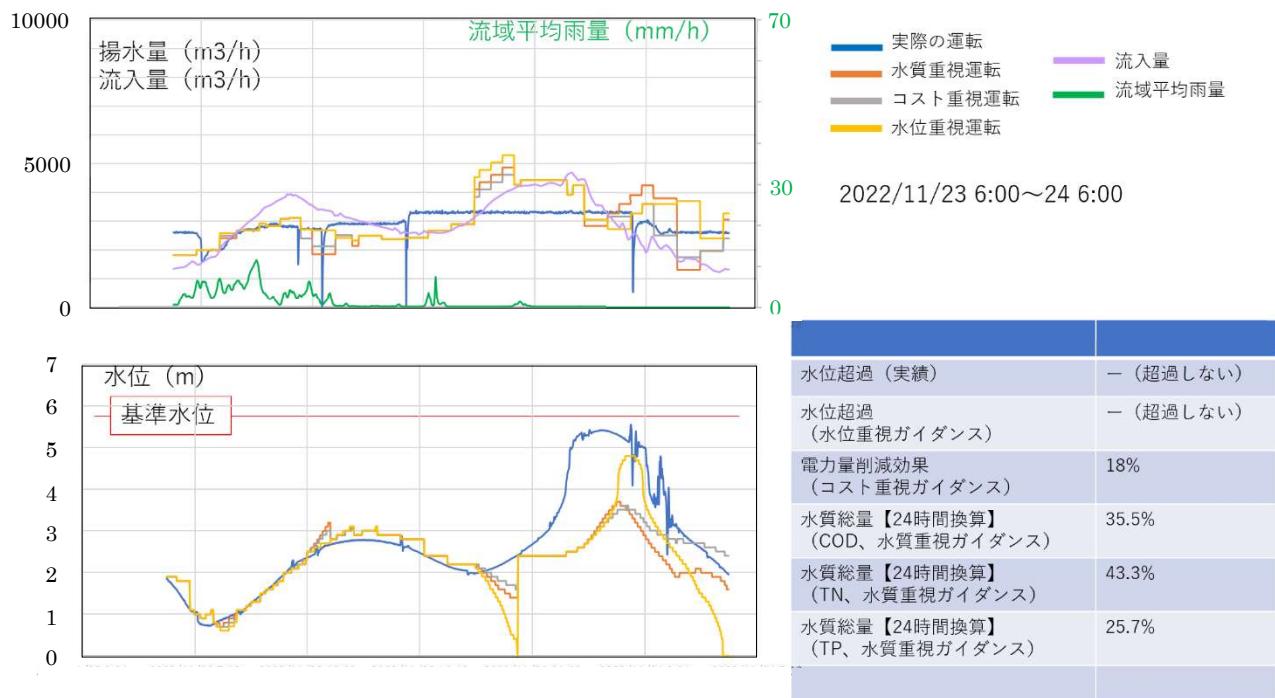
図資 2-17 運転ガイダンス事例⑬2022年11月13日

2022/11/20の事例



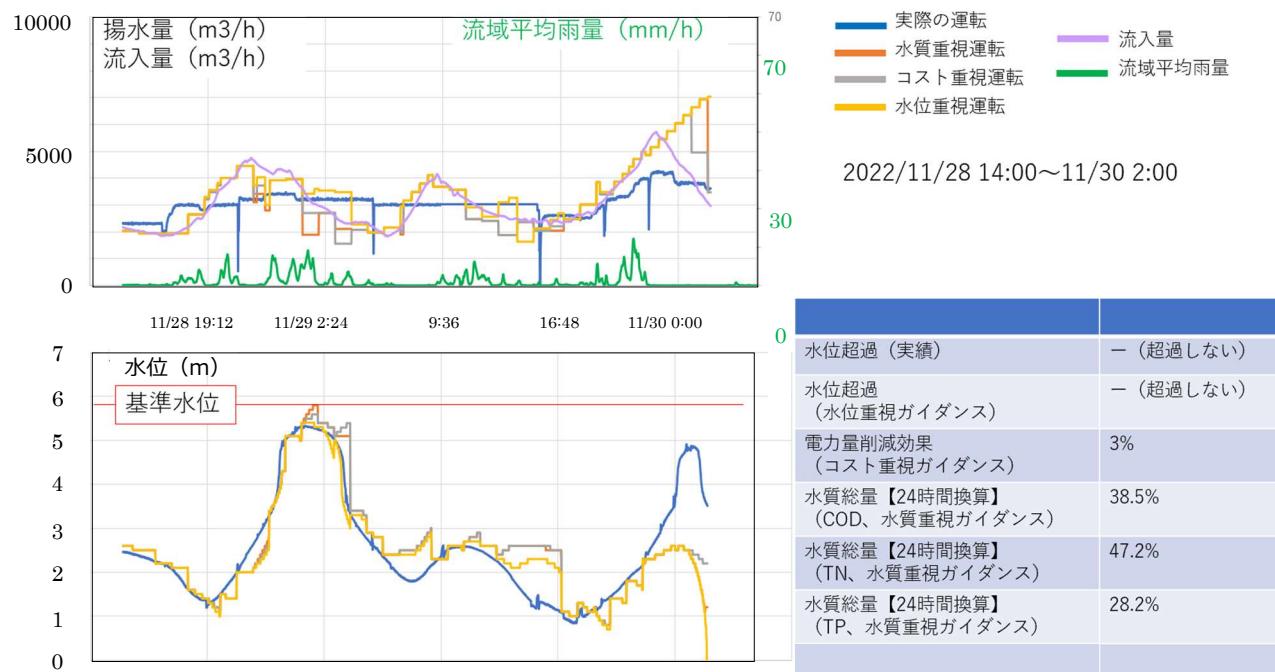
図資 2-18 運転ガイダンス事例⑭2022年11月20日

2022/11/23の事例



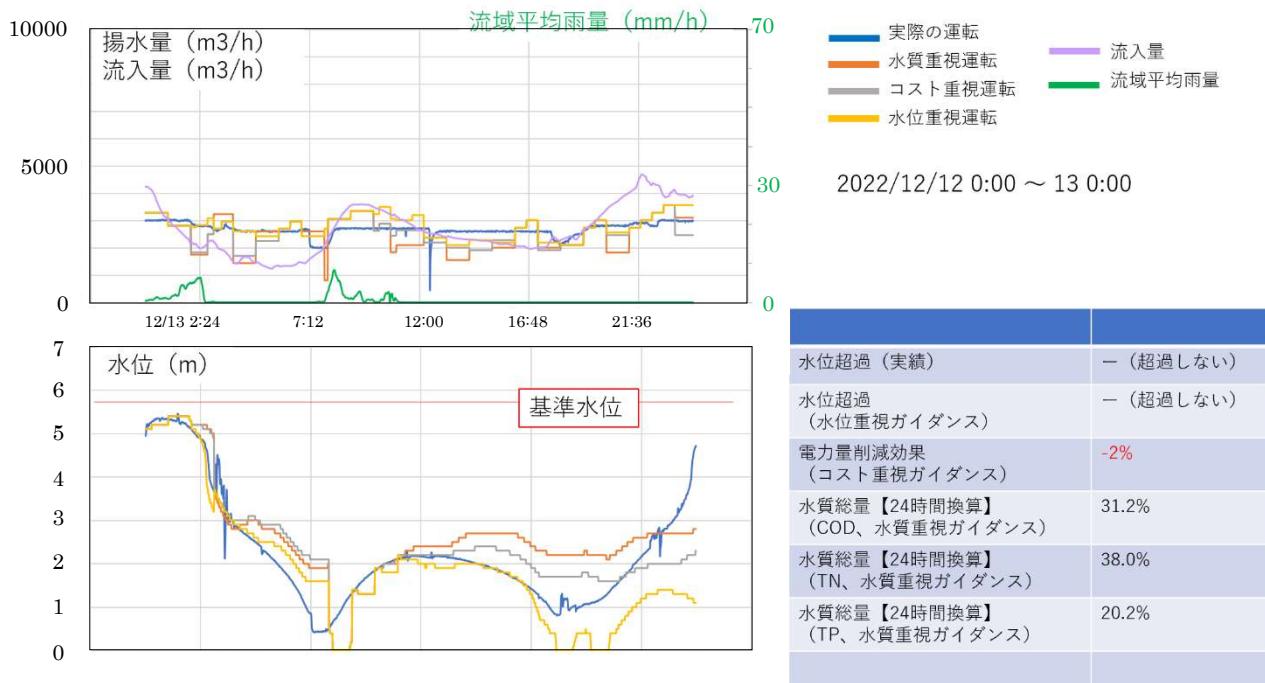
図資 2-19 運転ガイダンス事例⑯2022 年 11 月 23 日

2022/11/28の事例



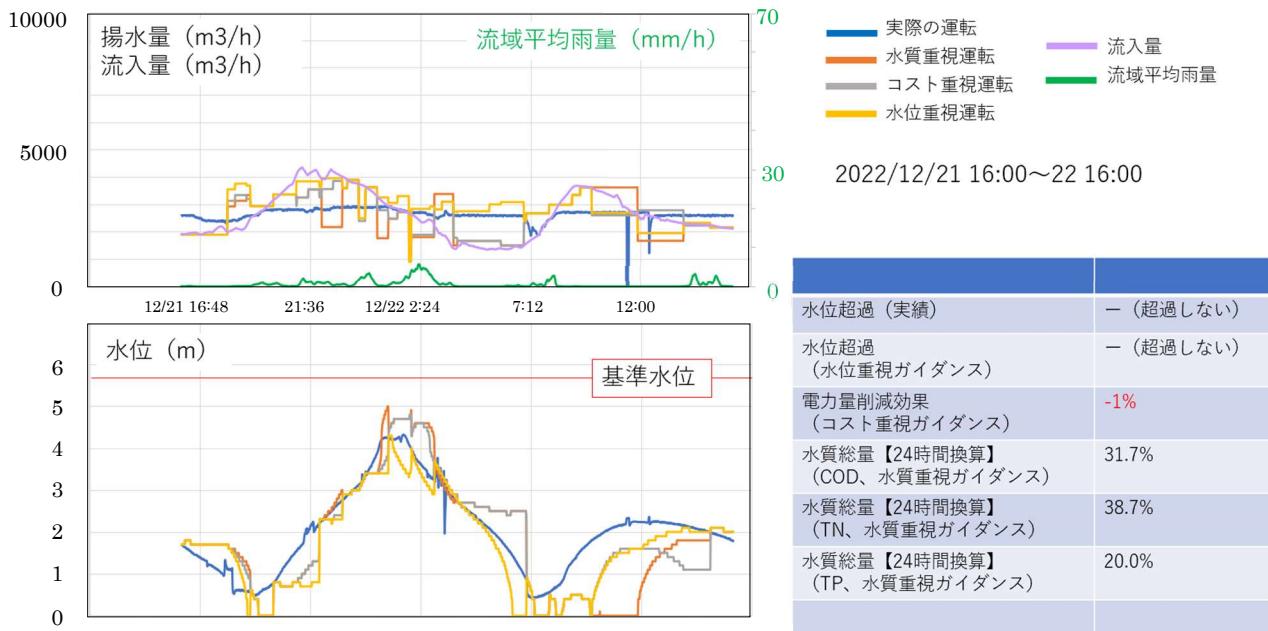
図資 2-20 運転ガイダンス事例⑯2022 年 11 月 28 日

2022/12/12の事例



図資 2-21 運転ガイダンス事例⑦2022 年 12 月 12 日

2022/12/21の事例



図資 2-22 運転ガイダンス事例⑧2022 年 12 月 21 日

今回の実証結果をまとめたものを以下に示す。

ガイダンスの評価 (2022/6/1～12/31)

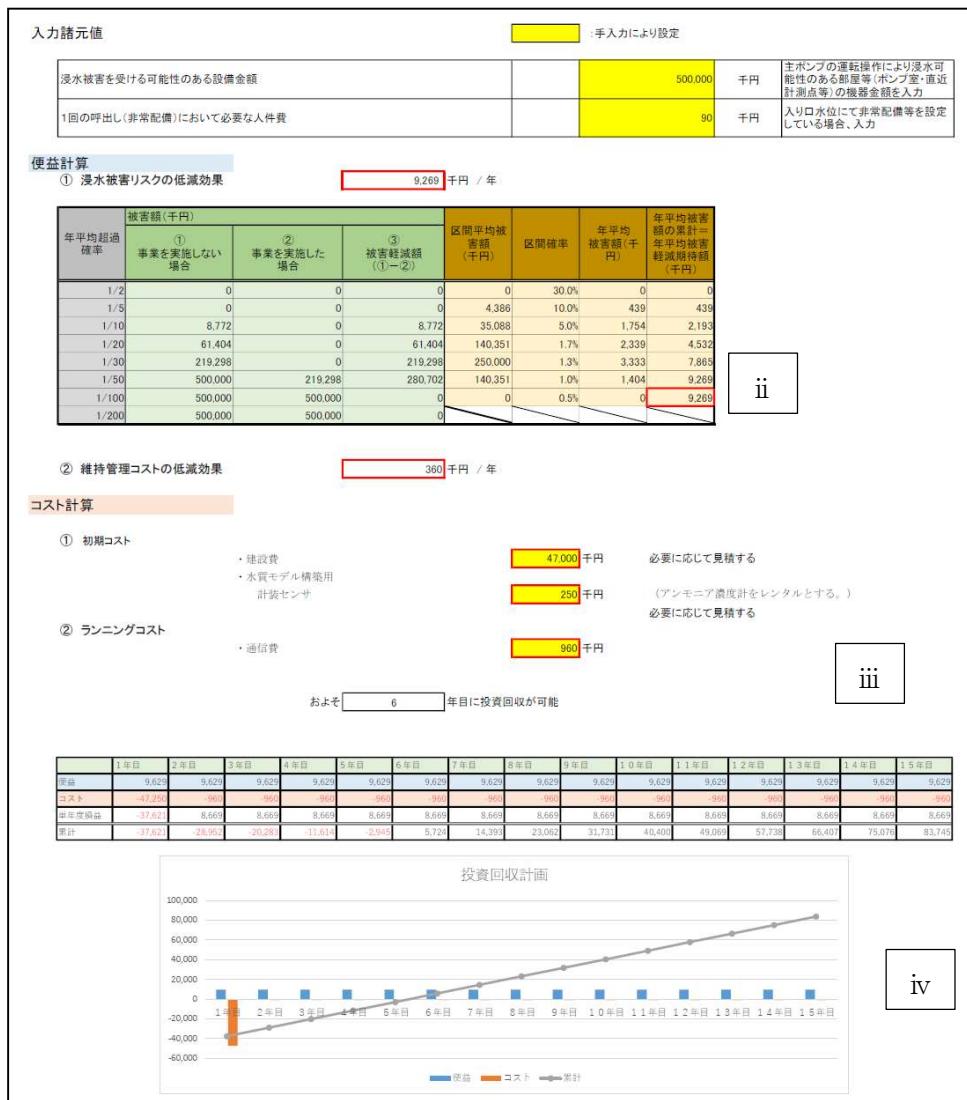
	6/21	7/3	7/9	7/12	7/19	7/26	8/12	8/25	9/2	9/8	9/23	10/7	11/13	11/20	11/23	11/28	12/12	12/21	全体評価
水位超過（実績）	—	—	—	—	—	超過	—	—	—	—	超過	—	—	—	—	—	—	—	○ (水位5.8m 超過回数10%削減 達成)
水位超過 (水位重視 ガイダンス)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
電力量削減効果 (コスト重視 ガイダンス)	-5%	8%	-13%	9%	20%	21%	-13%	-4%	14%	11%	-4%	2%	19%	-2%	18%	3%	-2%	-1%	5.0% (雨天時電力量 1.5%削減達成)
水質総量【24時間 換算】 (COD、水質重視 ガイダンス)	38.8 %	33.6 %	37.7 %	38.1 %	29.4 %	42.8 %	35.0 %	29.8 %	34.6 %	33.7 %	41.3 %	34.3 %	31.7 %	33.6 %	35.5 %	38.5 %	31.2 %	31.7 %	○ (総量規制値の60% 以下達成)
水質総量【24時間 換算】 (TN、水質重視ガ イダンス)	47.2 %	40.7 %	46.1 %	46.9 %	33.8 %	52.2 %	42.0 %	34.6 %	42.0 %	40.9 %	47.7 %	41.7 %	36.6 %	41.0 %	43.3 %	47.2 %	38.0 %	38.7 %	○ (総量規制値の60% 以下達成)
水質総量【24時間 換算】 (TP、水質重視ガ イダンス)	29.7 %	23.1 %	21.2 %	39.5 %	20.0 %	55.5 %	20.9 %	17.5 %	24.0 %	24.5 %	43.8 %	22.9 %	15.7 %	23.2 %	25.7 %	28.2 %	20.2 %	20.0 %	○ (総量規制値の60% 以下達成)

※水位超過の「-」は5.8m超過していないことを示す。

電力量の削減効果は各ケースにおける電力量削減効果割合の平均をとった値

3. 費用対効果算出ツールについて

浸水被害シミュレーションや導入効果などを事前に検証することは難しい。よって実証結果をもとに簡易な費用対効果算定ツールを策定したため、紹介する。



3-1. 費用対効果算出方法

i 必要な項目の入力

浸水被害リスク軽減額の計算のため、主ポンプの運転操作により浸水被害を受ける可能性のある部屋（ポンプ室等）の機器金額を収益として計上する。また、維持管理費用の低減効果（呼出し回数の低減）も期待できるため、呼出し時に必要となる費用に関しても収益として計上する。（呼出し等が無い場合は0を入力）

ii 得られる収益の計算

浸水被害リスク軽減額は実証結果を用いて総金額の比率（実証にて軽減できた比率を採用）で自動的に計算される。また、維持管理費用の低減効果に関しても実証結果を用いて、同様に計算する。計算方法に関しては0に記載する。

iii 初期費用、ランニング費用

建設費用に関しては概算金額ですでに入力されている。概算金額であるため、必要に応じて該当メーカに見積依頼を実施する。また、水質予測も導入する場合、アンモニア濃度計が必要となる（不要の場合0を入力）。

ランニング費用に関しては降雨回線の通信回線利用料が必要となる。（デフォルトでは実証で必要となった費用を記載。）

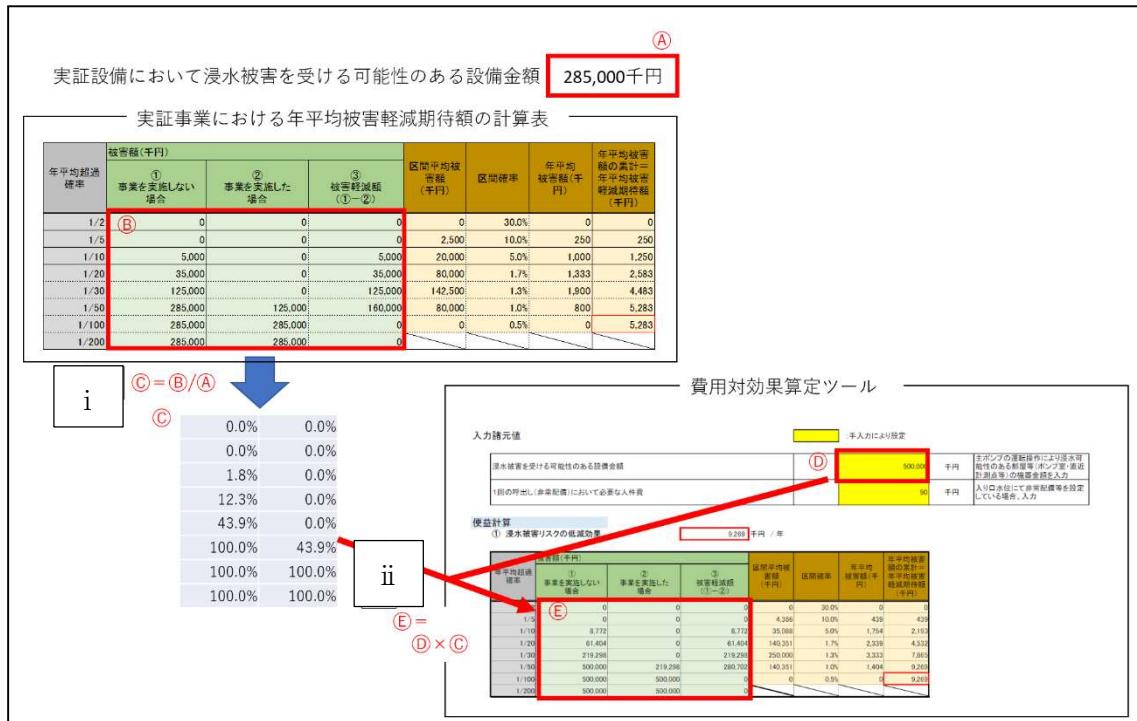
iv 投資回収計画

i～iiiを入力すると自動で作成される。一般的に監視制御装置の耐用年数は10～15年とされているため、15年目までの投資回収計画図が作成されるようになっている。

3-2. 費用対効果算出による利益の算出方法

① 浸水被害リスクの低減効果

浸水被害リスクの低減効果の算出模式図を図資3-2に示し、その計算方法を以下解説する。



図資3-2 浸水被害リスクの算出模式図

i 浸水被害比率（C）の算出

実証事業において浸水被害を受ける可能性のある設備金額（A）で、想定浸水被害額（B）を割ることで、「事業を実施しない場合」と「事業を実施する場合」における浸水被害比率（C = B/A）を算出する。

ii 想定浸水被害額（E）の算出

浸水被害比率（C）に費用対効果算定ツールにおいて入力される「浸水被害を受ける可能性のある設備金額（D）」を乗じることで想定浸水被害額（E = D × C）が算出され、該当機場における浸水被害期待軽減額が算出される。

② 維持管理費用の低減効果

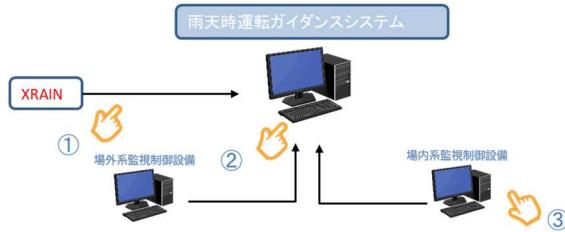
実証事業において呼び出し回数の期待軽減回数は年間4回と試算された（詳細は資料編2を参照）。よって呼び出し回数の低減に関する維持管理費用の低減効果は（1回の呼び出し（非常配備）において必要な人件費【費用対効果算出ツールの入力値】）×（4【実証結果】）によって算出することができる。

4. セキュリティ対策

本システムは各種データを活用した装置であり、適切なセキュリティ対策を施すことが望ましい。今回の実証において対策した主要なセキュリティ対策内容を図資 4-1 に示す。

雨天時運転ガイダンスシステムにおけるセキュリティ対策

雨天時運転ガイダンスシステムは、大きく3点のセキュリティ対策を実施しています。



図資 4-1 雨天時運転ガイダンスシステムにおけるセキュリティ対策

- ① 降雨情報回線は「**VPN(Virtual Private Network)**」技術を活用した閉域網にて構築
閉域通信網の構築によりインターネットなどの外部ネットワークからのアクセスを防いでいる。
- ② 雨天時運転ガイダンスシステムに「**ホワイトリスト型セキュリティ対策ソフト**」を搭載
許可されたソフトウェアしか実行されないため、万が一のウィルスソフトウェア混入の際も**ウィルスソフトウェアは起動されない**。
- ③ 過去データの事前分析監視制御装置から出力される CSV データを外部媒体 (DVD 等) に出力し、分析

5. 実証設備操作説明資料

雨天時運転ガイダンスシステムの操作説明資料を以下に示す。

AI を用いた分流式下水道における 雨天時浸入水対策技術実証

検証用システム 操作説明書

2022/4 (12月20日一部改訂)

0 アウトライン

1 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

2 運用の流れ

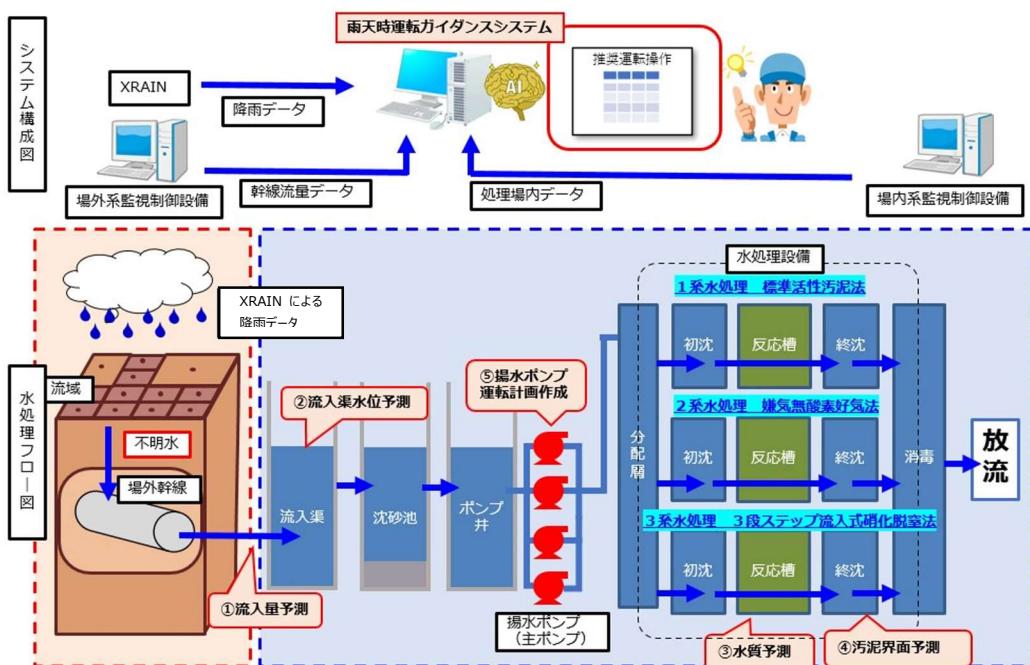
3 画面レイアウトのご説明

4 通常モード操作のご説明

5 予測モード操作のご説明

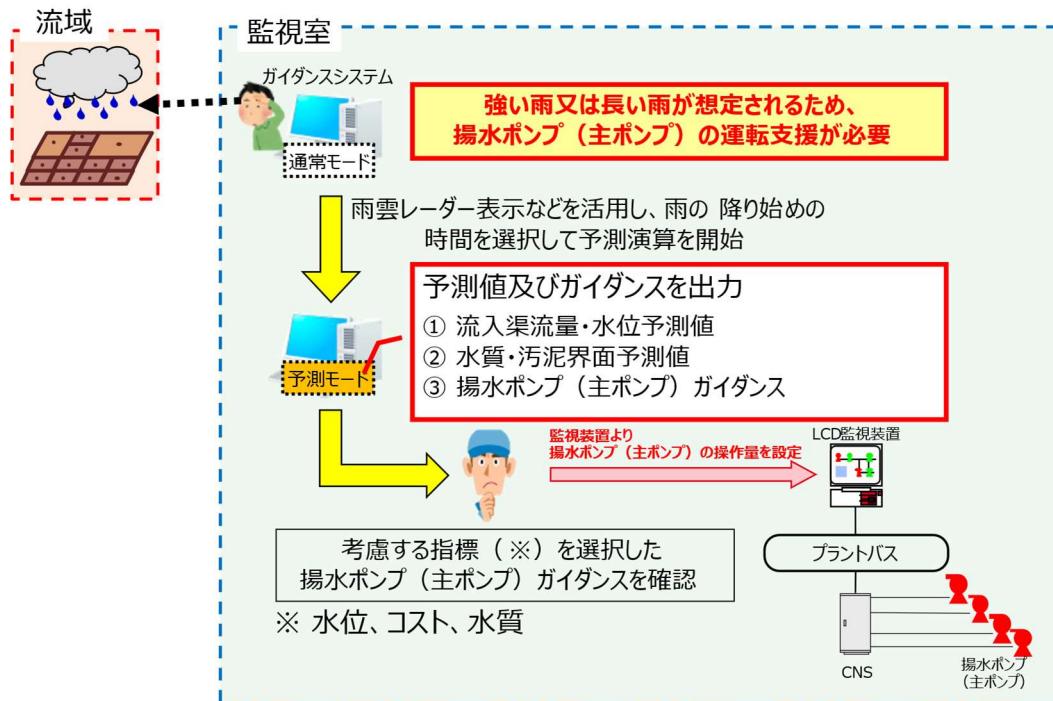
2

1 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



3

2 運用の流れ



4

3 画面レイアウトのご説明

(1) 通常モード

「通常モード」
選択時



5

3

画面レイアウトのご説明

(2) 予測モード



4

通常モード操作のご説明

(1) トレンド表示



4 通常モード操作のご説明

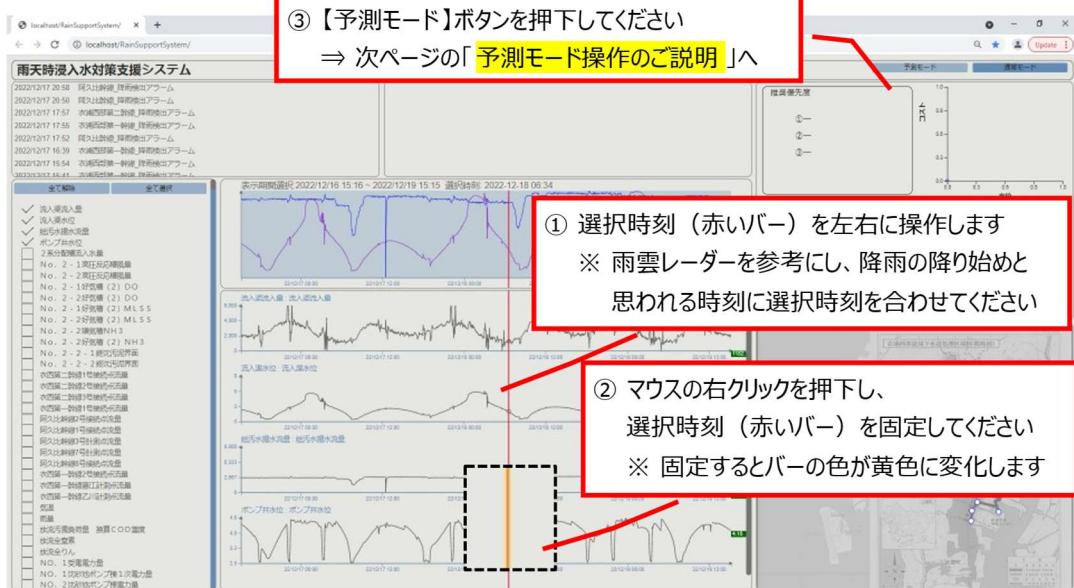
(2) メッセージ表示



8

4 通常モード操作のご説明

(3) 予測モード切替

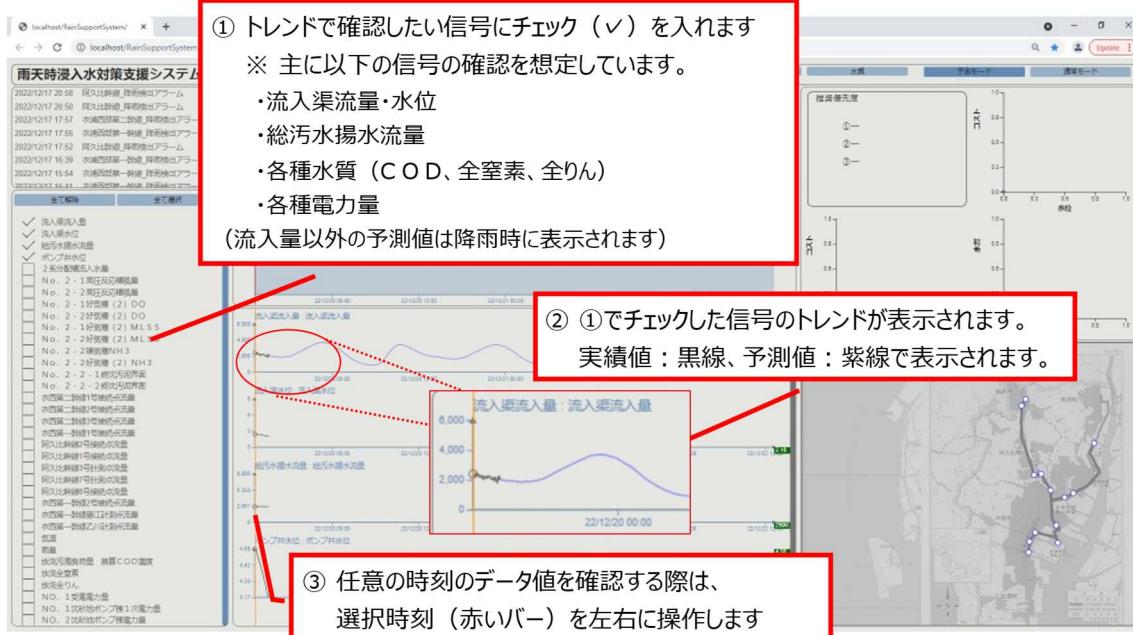


9

5

予測モード操作のご説明

(1) トレンド・予測値表示



※本画面はデモ画面であるため、流入量のみ予測値表示しています。 | 10

5

予測モード操作のご説明

(2) 降雨パターン切替



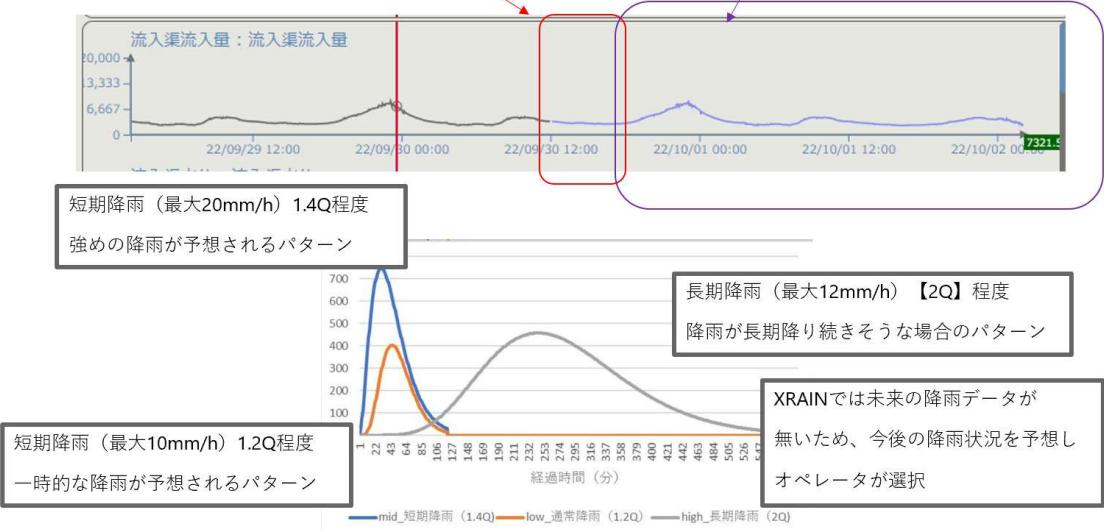
※本画面はデモ画面であるため、流入量のみ予測値表示しています。 | 11

降雨パターンの選択

流入量予測の表示原理

直近：タイムエリア法による流入量予測

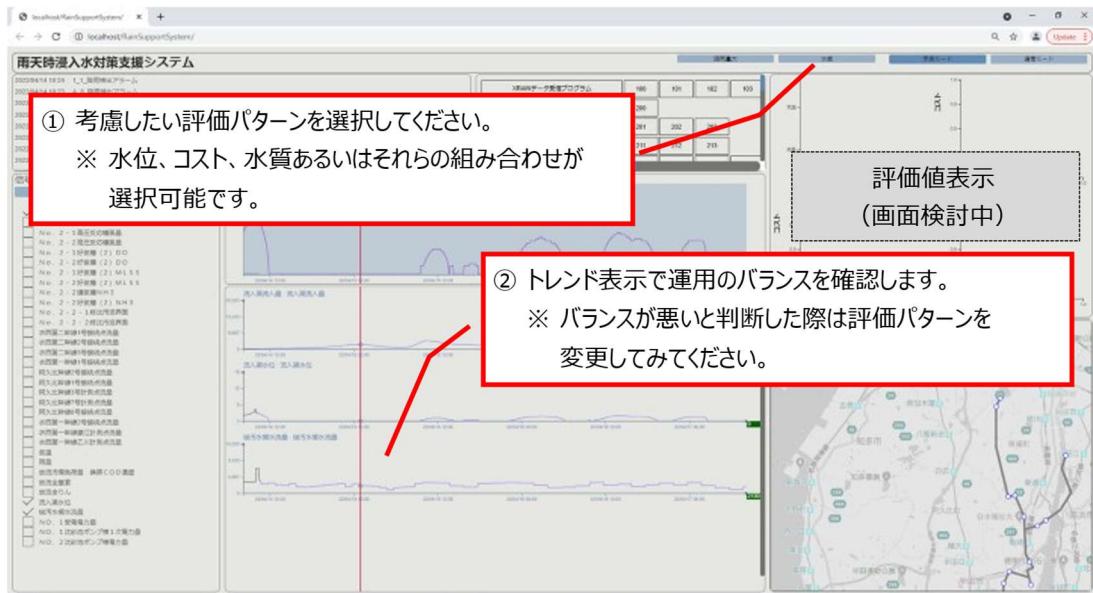
(概ね 2 時間はタイムエリア法で予測)



12

5 予測モード操作のご説明

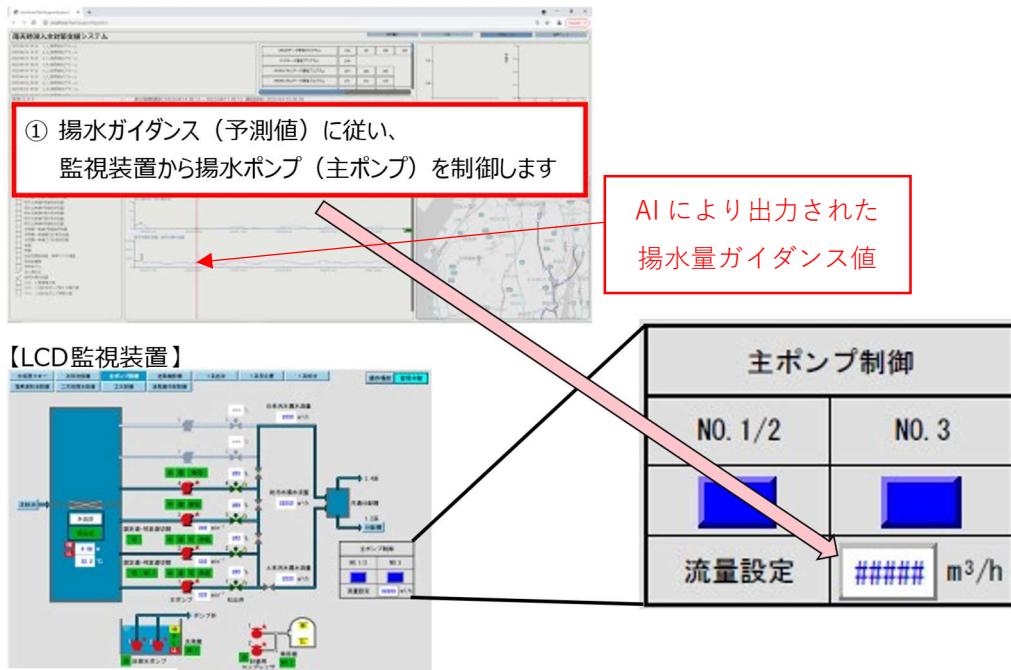
(3) 評価指標切替



13

5 予測モード操作のご説明

(4) 揚水ポンプ（主ポンプ）の制御設定

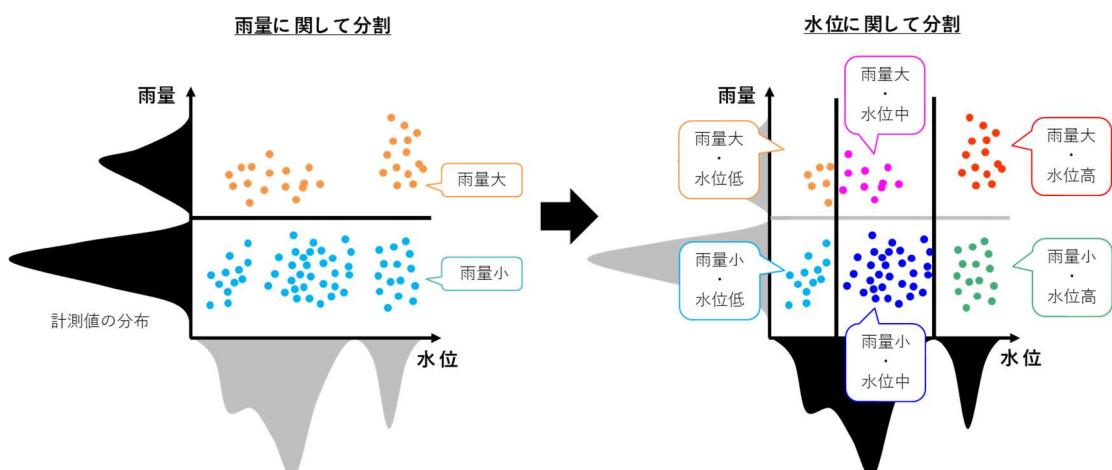


6. 運転パターン分類技術の詳細

本項では、運転パターン分類技術の概要について記載する。本技術は監視制御システムに蓄積された過去の計測データを用いて、1日のプラント状態の流れから標準的な運転や特徴的な運転を行った日をパターンに分類する。分類した運転パターン毎にリスク・コスト・水質などの観点で評価を行い、運転操作の判断に影響している様々な因子を特定し、操作員がどのような状況でどのような運転をしているかを明らかにする。また多目的最適化において、特定した影響因子を考慮したガイダンスの作成を行うことにより、機械的な最適化に加えて、より実際の運用に即した推奨のガイダンス提示が可能となる。また、運転操作に影響を与える降雨の特徴を抽出し、特徴に基づいた降雨を想定した流入量パターンを作成することにより、蓄積データだけでは網羅できなかった降雨に対してもガイダンスが可能となる。

【Step1】信号空間軸でのプラント状態分割

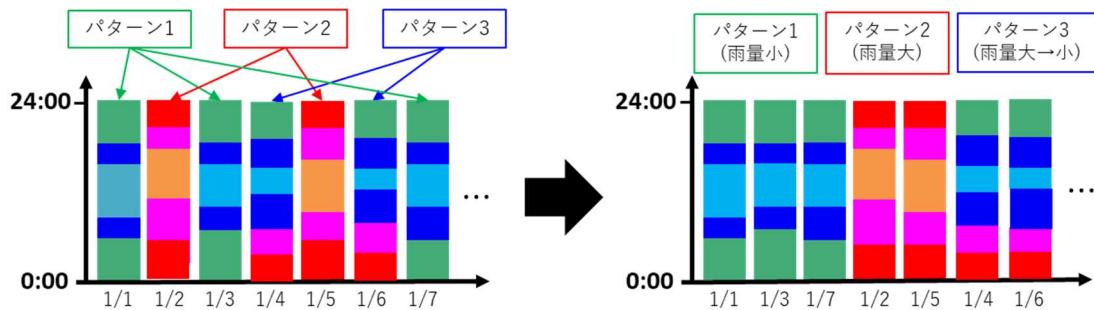
水位、揚水量、流入量、雨量、水質など、揚水ポンプ運転に関連する各計測値の分布に基づいて、逐次的にクラスタリング手法 (k-means) を用いて分割を行い、プラントの状態を区分する。



図資 6-1 信号空間軸でのプラント運転状態分割

【Step2】プラント状態遷移による運転パターン分類

Step1 で分割したプラント状態を用いて時系列データを表現し、24 時間のプラント状態の流れが類似している日同士を順次統合することで、運転パターンに分類する。



図資 6-2 プラント状態遷移による運転パターン分類

7. 水質予測技術のその他処理方式への適用について

実証事業では、A2O 法への適用を確認することができた。よって反応槽プロセスがより簡易で、パラメータの調整が容易な標準活性汚泥法においても本技術は問題なく適用が可能である。本実証事業では A2O 法以外の処理方式には適用していないが、その他処理方式に適用する注意点を以下に記載する。

表資 7.1 活性汚泥モデルの他処理方式への適用注意点

対象ケース	プロセスの特徴	活性汚泥モデル適用時の留意点
都市下水を対象とした標準活性汚泥法	IWA タスクグループが対象として想定したプロセス	反応速度論定数および化学量論係数に関して、「デフォルト値」を最も適用しやすい
膜分式活性汚泥法	流入直後は有機物の濃度が高く、処理時間の経過に伴って減少し、大きな濃度勾配が生じる	有機物の貯蔵が考慮されていない ASM2d では流入直後の急激な有機物接種を表現できない
ステップ流入式多段硝化脱窒法	ステップ流入比および位置を最適化する必要がある	有機物の濃度変化を予測して、ステップ流入の量や位置を検討したい場合、ASM2d では適用できない可能性がある。 (濃度変化の予測は不適)

8. 参考文献

- 1) 下水道維持管理指針 総論編 マネジメント編 実務編【2014年版】
公益社団法人 日本下水道協会
- 2) 下水道用語集【2000年版】
公益社団法人 日本下水道協会
- 3) AI戦略2022【令和4年4月】
内閣府 統合イノベーション戦略推進会議
https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aistrategy2022_honbun.pdf
- 4) K. DebPratap, S. Agarwal, and T Meyarivan. A. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: nsga-II. *Trans. Evol. Comp.*
<https://ieeexplore.ieee.org/document/996017>
- 5) XRAINデータフォーマット仕様書
http://www.river.or.jp/koeki/opendata/data/dataformat_xrain_ver1_2.pdf
- 6) 第2回 IWA活性汚泥モデルの構造, 味埜俊, 学会 誌「EICA」第7巻第4号
(2002) , 43-49

9. 問い合わせ先

本技術ガイドラインに関する問い合わせは、以下にお願いします。

国土交通省 国土技術政策総合研究所	国土交通省 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部 下水処理研究室 〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 TEL 029-864-3933 FAX 029-864-2817 URL https://www.nilim.go.jp/
----------------------	---

本書は、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）により国土交通省国土技術政策総合研究所が下記の企業・団体に研究委託を行い、その成果をとりまとめたものです。

＜実証研究者 連絡先＞

三菱電機(株)	三菱電機株式会社 ファシリティインフラシステム事業部 社会システム第一部 第一課 〒100-8310 東京都千代田区丸の内二丁目 7 番 3 号 TEL 03-3218-1156 FAX 03-3218-2893 URL https://www.mitsubishi-electric.co.jp/
(大) 東京大学	東京大学経営企画部 国際戦略課東京カレッジチーム 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-3812-2111 URL https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/index.html
(公財) 愛知水と緑の公社	愛知水と緑の公社 下水道部管理課 〒460-0002 名古屋市中区丸の内三丁目 19-30 TEL 052-971-3045 FAX 052-971-3053 URL http://aichi-mizutomidori.or.jp/
愛知県	愛知県 知多建設事務所 都市施設整備課 〒475-0828 愛知県半田市瑞穂町 2-2-1 TEL 0569-21-3314 URL https://www.pref.aichi.jp/

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1324 November 2025

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675