特集

DX を加速させる AI 最新技術
～現場を助ける DX と AI～

東京アメッシュや幹線水位計を活用した流入量予測と運転支援ガイダンスの開発



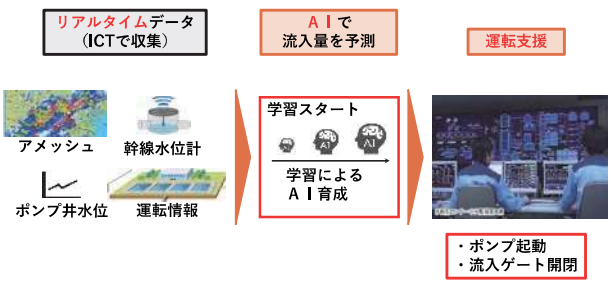
山岸 清隆

東京都　下水道局
計画調整部　技術開発課長

1．はじめに

近年頻発する集中豪雨や大型化する台風により、短時間に大量の雨水がポンプ所等へ流入する事例が増加しています。運転員は、東京都下水道局（以下、「当局」という）で導入している降雨情報システム「東京アメッシュ」の降雨情報やポンプ所等の水位情報など、複数の情報を総合的に把握しながら、短時間で雨水ポンプの起動等を的確に判断する必要があります。また、こうした判断や操作技術の習熟には豊富な経験が求められます。将来、担い手不足が見込まれる中、運転員の判断を適切に支援し、より効率的に運用するための技術開発が求められています。

そこで当局では、流入幹線上流部の水位情報や降雨情報等を用いるとともに、瞬時に多数のデータを解析できる AI の特性を生かし、一定の精度を有する流入量予測モデルの開発及び流入予測に基づく運転支援のガイダンスシステムの構築を目指しました（図−１）。膨大な情報を AI が解析し、将来の流入状況を予測することで、運転員は運転判断に必要な情報をより早い段階で把握できるようになります。これにより、迅速かつ的確な判断が可能となるとともに、経験の浅い運転員についても AI の支援を受けながら確実な雨水ポンプの運転ができることが期待されます。

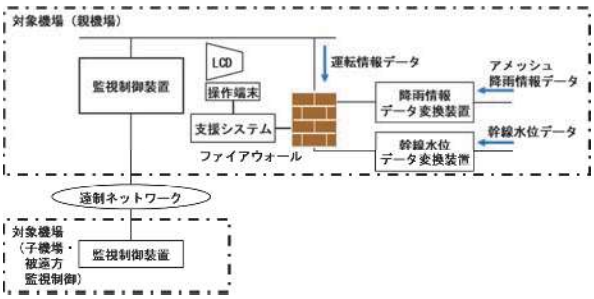


図−１　AI を活用した雨天時のポンプ運転のイメージ

本稿では、開発した運転支援システムの概要を示すとともに、予測モデルの検証及び評価方法、その結果と考察について報告します。また、実装に向けたシステム改良の取組について紹介します。

2．運転支援システムの概要

運転支援システムは、支援システム本体（LCD 及び操作端末を含む）、データ変換装置及びファイアウォール等で構成されており、それぞれをオンラインで接続しています（図−２）。



図−２　運転支援システムの構成

本システムでは、流入量予測及び運転支援のガイダンスシステムに必要なデータをリアルタイムで収集し、予測モデルに反映します。活用するデータは、「運転情報データ」、「幹線水位データ」及び「アメッシュ降雨情報データ」の３種類です。

（１）運転情報データ

運転情報データは、監視制御装置から取得するポンプ井水位、ポンプ運転状態、阻水扉開度等の情報

であり、設備の運転状況を把握するとともに、流入量予測に用いる基礎データです。

対象機場の監視制御装置から、送信間隔を１分以内として各種データを取得しました。

（２）幹線水位データ

幹線水位データは、ポンプ所等へ到達する前の流入幹線内の水位変化を把握するものであり、降雨に伴う流入量の変化を早期に捉えるうえで重要なデータです。

対象機場処理区内に必要な幹線水位計を設置し、幹線水位データ変換装置でデータ集約したうえで、送信間隔を１分以内（晴天時は 10 分以内）として取得しました。なお、水位計には、下水道管内の水位をリアルタイムに計測できる多機能型マンホール蓋水位計（圧力式）を用いました。

（３）アメッシュ降雨情報データ

アメッシュ降雨情報データは、排水区域内及びその周辺の降雨分布を把握するものであり、降雨の移動や強度の変化を予測モデルへ反映するための重要なデータです。

東京アメッシュが観測する 150m メッシュの降雨情報を、降雨情報データ変換装置を介して送信間隔１分以内で取得しました。

これらのデータを運転支援システムに集約し、流入量予測モデルにより将来の流入量を算出するとともに、ポンプ井水位の変化を予測します。その結果に基づき、雨水ポンプ等の運転に関するガイダンスを運転員へ提供します。なお、本システムは監視制御設備の運転判断を支援することを目的としており、既存の監視制御システムとは独立した構成としています。

３．予測モデルの検証及び評価方法

本研究では、当局の政策連携団体である東京都下水道サービス株式会社と５社の民間事業者との共同研究として検証を実施しました。流入特性や制御方式、流入量予測手法が異なる５機場を対象とし、各機場について１社が流入量予測モデル及び運転支援のガイダンスシステムの構築を担当しました(表−1)。

検証では、運転支援システム本体や構成機器を接続するネットワーク機器等が安定して稼働することを確認するとともに、流入量予測及びガイダンスの精度を評価しました。なお、流入量予測は、運転員が予測結果やガイダンスを確認し、最終的な判断及び運転操作を行うための時間を考慮し、10 分先を対象としました。

（１）流入予測モデルの開発

流入量予測の基本的な入出力構成は全機場で共通とし、入力となる説明変数には「運転情報データ」、「幹線水位データ」及び「アメッシュ降雨情報データ」を用いました。また、出力となる目的変数は「対象機場への流入量」としました。一方で、排水区域の規模、流入幹線の構成、ポンプ設備の能力及び運転管理指標は機場ごとに異なります。そのため、予測手法は一律の方式とはせず、各 AI 開発者の知見と機場特性に応じて、時系列解析、機械学習、深層学習及び物理的な流出解析手法等を組み合わせて適用しました。このように、システム構成や評価方法は共通化しつつ、予測モデルについては各機場の特性に応じて構築しました。

流入量予測モデルは、予測流入量と実績流入量の整合性により評価しました。定量的な評価として、Nash-Sutcliffe 係数（以下、「NS 係数」という。）を採用しました。NS 係数は、流量のばらつきを考慮してモデルの再現性を評価する指標であり、値が 1.0 に近いほど高い予測精度を示します（図−３）。流入量予測精度の目標値は、降雨強度 20mm/h 以上の豪雨時を対象として、モデルの再現性が高いとされる NS 係数 0.7 以上(10 分先予測)としました。

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

N: 計算時間　　$q_0(i)$: i 時の実績流量

$q_c(i)$: i 時の計算流量　　q_{av}: 実績流量の平均値

図−３　NS 係数の算出方法

表−１　対象機場と流入量予測手法

対象機場	流入		制御	流入量予測手法
	汚水	雨水		
A ポンプ所	−	○	被遠方制御	CNN+RNN（LSTM）
B ポンプ所	−	○	被遠方制御	LSTM
C ポンプ所	○	○	−	外部入力付き自己回帰型線形回帰
D ポンプ所	○	○	−	タイムエリア法・粒子フィルタ
E 水再生センター	○	○	−	VAE+GBRT

また、豪雨時の運転支援では、流入量の立ち上がりを適切に予測できているか、また予測誤差がポンプ運転台数の判断に影響する程度であるかが重要となります。このため、本研究では NS 係数による定量評価に加え、実績流入量と予測流入量との差について時系列で評価しました。

（2）ガイダンスシステムの構築

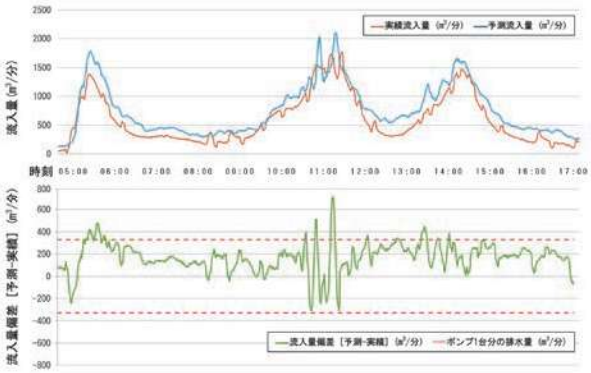
ガイダンスシステムは、「運転員の実際の操作時刻及び操作内容」と「システムの通知時刻及び通知内容」を比較することで評価しました。定性的な評価として、対象機場の運転管理指標に基づき、システムが適切な内容のガイダンスを雨水ポンプの運転が必要となる 10 分前までに通知できているかを確認しました。

4．結果及び考察

（1）流入予測モデルの評価

オンライン接続によるリアルタイムでのデータ取得において、ICT データの遅延や欠損等は発生せず、運転支援システム及びネットワーク機器は安定して稼働しました。また、10 分先の流入量予測については、5 機場全てにおいて豪雨時を対象とした目標値である NS 係数 0.7 以上を達成しました。

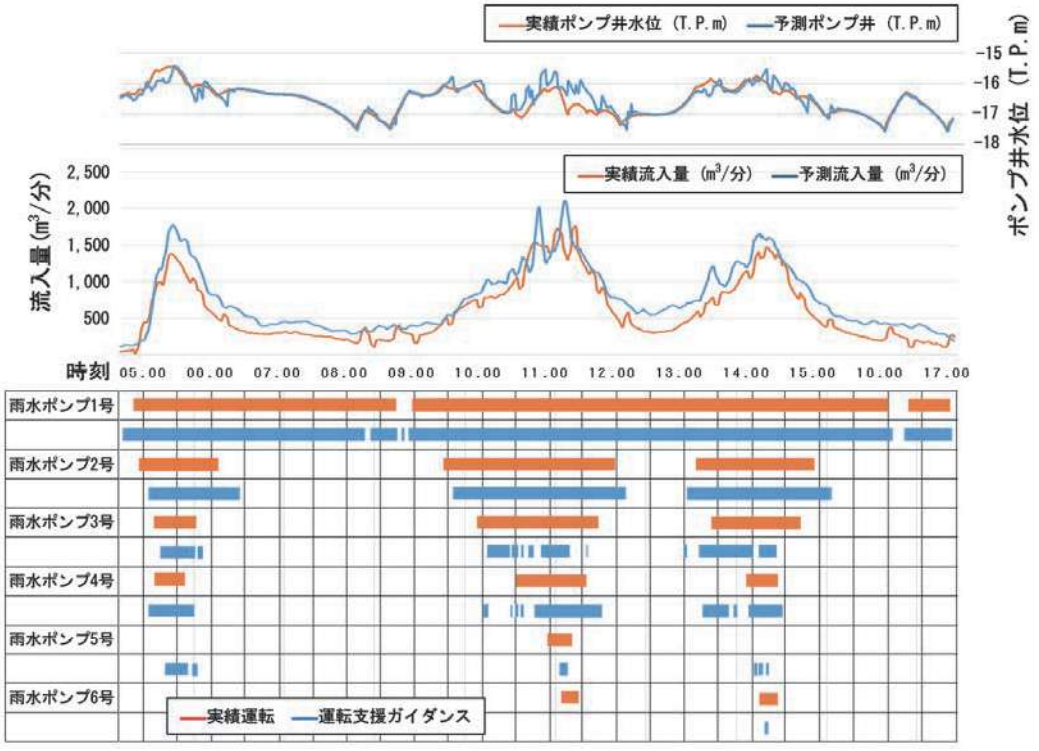
流入量予測の結果の一例として、降雨強度 20.0mm/h、降雨総量 81.5mm、NS 係数 0.75 となった降雨事例を示します（**図−4**）。予測流入量は、降雨状況に応じて発生した 3 つの流入ピークを概ね捉えており、流入量の変動を良好に再現できていることを確認しました。また、予測流入量は実績流入量をやや上回る傾向がみられましたが、実績を下回る予測に比べて、運転判断上は安全側の予測結果であったと考えられます。さらに、実績流入量と予測流入量との差を時系列で示した結果、降雨開始から終了までの期間を通じて、予測誤差は概ね最小容量のポンプ 1 台分の揚水量の範囲内に収まっていました。このことから、運転支援に活用するうえで実用的な精度を有していると評価しました。



図−4 時系列での流入量予測や偏差の結果

（2）ガイダンスシステムの評価

ガイダンスの評価では、多くの事例で運転員によ



図−5　ガイダンスの結果

る実際の操作に先行して雨水ポンプの運転を通知しており、運転支援システムとして有効に機能していることを確認しました（図−５）。一方で、予測精度が十分に確保されている場合であっても、流入量やポンプ井水位の微小な変動に対して過敏に反応し、運転・停止のガイダンスが短時間に繰り返し発出される、いわゆるチャタリングが一部で確認されました。このような状況においても、運転員は安定した運転を継続していたことから、ガイダンスシステムの実用化に当たっては、予測精度の向上だけでなく、運転・停止水位に不感帯を設けることや、ポンプ起動後の一定時間は停止ガイダンスを抑制することなど、現場の運転感覚に即した制御ロジックの調整が重要であることが分かりました。

５．実装に向けた取組の工夫

（１）ICT データ欠損時における流入量予測

運転支援システムを実運用するうえでは、通信異常や機器故障等により ICT データが一時的に欠損する場合も想定しておく必要があります。このため、データ欠損時においても可能な限り流入量予測及び運転支援を継続できる仕組みとしました。具体的には、幹線水位データやアメッシュ降雨情報データについては、短時間の欠損であれば直前値を用いて補完することで、最低 10 分間まで流入量予測を継続できる仕様としました。

一方、運転情報データは、ポンプ井水位やポンプ運転状態など施設の現在状態を示す重要な情報であるため、欠損が長時間継続した場合はガイダンスの信頼性が低下します。このため、一定時間を超える欠損が発生した場合には演算を停止し、データ欠損中又は演算停止中であることを画面上に明示する仕様としました。

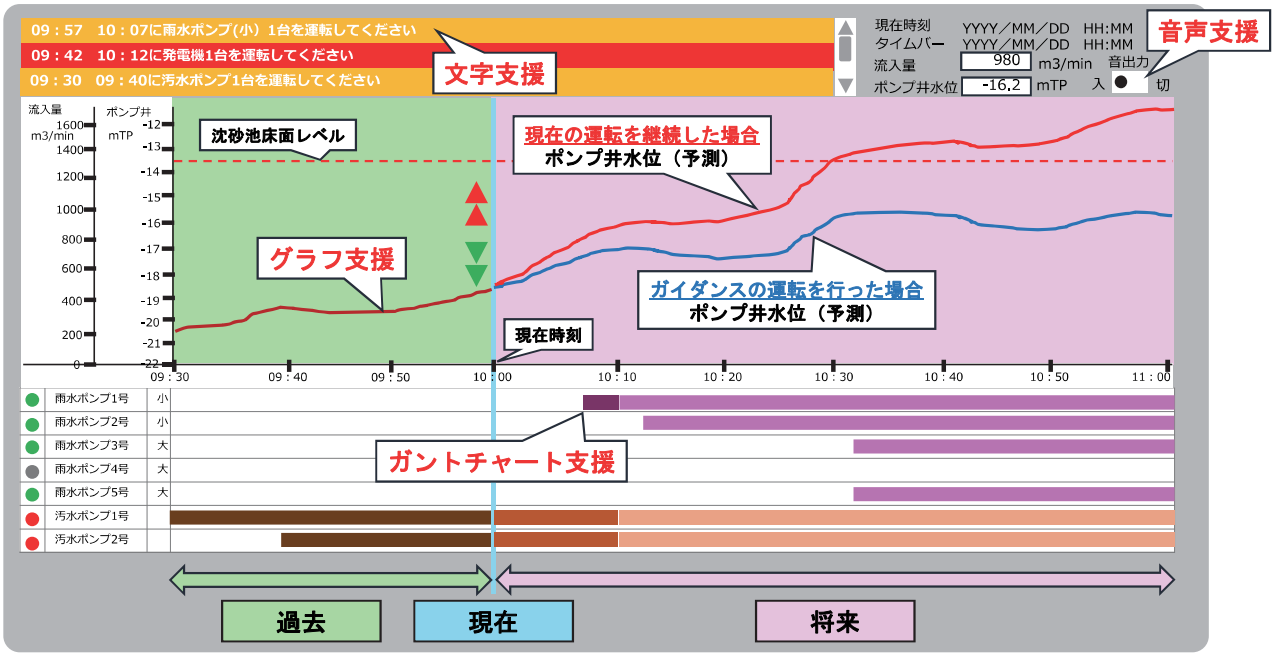
（２）安全側運転支援のガイダンスシステム構築

AI を用いた予測モデルは、過去の学習データに基づいて将来の流入量を予測するため、学習データの少ない降雨パターンや局所的な降雨変化に対しては、予測値と実績値との間に乖離が生じる可能性があります。このため、本研究では AI による予測結果のみに依存することなく、実ポンプ井水位の急上昇、実績流入量と予測流入量との偏差、運転可能なポンプ台数及び沈砂池冠水の可能性等を考慮した判定条件を設定し、安全側の運転支援が行えるガイダンス機能を構築しました。

具体的には、流入量予測が一定時間にわたり過小又は過大となった場合に、雨水ポンプの運転台数を補正するガイダンスを発出する仕様としました。これにより、AI 予測の不確実性を補完しながら、施設の安全性を考慮した運転支援を行えるようになりました。

（３）ガイダンス画面の仕様

運転支援システムは、運転員が短時間で状況を把握し、適切な運転判断を行えることを重視して画面構成を検討しました。本システムでは、ポンプ所等への流入量予測結果を基に、過去、現在及び将来の情報を１分ごとに更新し、１つの画面上で視覚的に



図−６ ガイダンス画面のイメージ

確認できる構成としました。画面は、直近で必要な運転支援内容を表示する「文字・音声支援」、ポンプ井水位及び流入量の推移を表示する「グラフ支援」、設備の運転・停止状況を時間軸上で表示する「ガントチャート支援」により構成しています（図−６）。

文字ガイダンスは、運転員が直近で必要となる操作内容を迅速に把握することを目的としています。グラフ表示は、流入量やポンプ井水位の変化を過去から将来まで連続的に把握するために用います。また、ガントチャート表示により、設備の運転実績及び今後必要となる運転支援の内容を時間軸上で確認できるようにしました。さらに、音声通知は画面を常時監視できない場合に有効ですが、通知頻度が過度に高い場合は運転員の負担となる可能性があります。このため、実装に当たっては、重要度に応じた通知設定や任意の入切機能を設けることが有効であると考えられます。

（４）振り返り機能とシミュレーション機能

運転支援システムの実用性を向上させるため、過去の降雨事例における流入量予測やガイダンスの状況を再現できる「振り返り機能」及び入力条件や運転条件を変更して検証を行う「シミュレーション機能」を実装しました。これらの機能は、システム改善に活用できるだけでなく、経験の浅い運転員の教育訓練や技術継承にも有効であると考えられます。特に、豪雨対応は発生頻度が限られる一方で、判断の遅れが施設運用に大きな影響を及ぼす可能性があります。このため、過去の事例を用いた振り返りやシミュレーションによる反復的な訓練を行うことで、運転判断に関する知見や経験の蓄積につながることが期待されます。

６．おわりに

東京都下水道局では、リアルタイムに取得する運転情報データ、幹線水位データ及びアメッシュ降雨情報データを活用し、一定の精度を有する流入量予測モデル及び流入量予測に基づく運転支援のガイダンスシステムを開発しました。

共同研究による検証の結果、５機場全てにおいて目標とした流入量予測精度を達成するとともに、運転員による雨水ポンプの運転判断を支援するうえで有効であることを確認しました。また、実装に向けた検討を通じて、ICT データ欠損時の対応や安全側の運転支援、運転員が活用しやすい画面構成など、実運用上重要となる知見を得ることができました。

下水道施設の運転及び維持管理は、社会インフラとして極めて重要であることから、今後も予測精度やガイダンス機能の向上を図り、本システムの信頼性をさらに高めていきます。また、運転支援システム等により蓄積される各種データの利活用を進めることで、運転管理及び保全管理の高度化を図り、下水道施設全体の DX につながる技術開発を推進していきます。