

## 〈研究発表〉

### 浸水リスク低減とポンプ起動停止回数の削減を図る雨水ポンプ制御

山中 理<sup>1)</sup>, 時本 寛 幸<sup>1)</sup>, 鳴海 啓 太<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター  
(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail: osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部  
(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72番地34 E-mail: keita.narumi@toshiba.co.jp)

#### 概要

本論文では、流入量予測を用いて雨水ポンプの起動/停止の設定水位を動的に変化させる動的な水位設定制御を提案する。従来、予め設定した所定の起動/停止水位に基づく水位設定制御が広く用いられているが、ポンプ井容量が十分でなくポンプの起動/停止に時間を要する場合や流入量の変動が大きい場合、設定水位が適切でないと、ポンプの発停頻度が増加したり浸水リスクが増大することがある。そこで、水量収支に基づいて設定水位を動的に変化させることでポンプ井ピーク水位の上昇抑制とポンプの起動停止回数の削減を図る、実用的な雨水ポンプ制御手法を提案する。また、数値シミュレーションにより、提案する制御は、従来の水位設定制御に対して、ポンプの起動停止回数を0.5~0.6倍程度に削減でき、また計画流入量以下の流入量に対して警戒水位を逸脱しないようにピーク水位を維持できることを示す。

キーワード：雨水ポンプ制御, 雨水排水システム, 雨水流入量予測, ポンプ発停頻度増加, 浸水リスク低減  
原稿受付 2022.6.30 EICA: 27(2・3) 35-40

## 1. はじめに

近年増加する集中豪雨や局地的大雨(ゲリラ豪雨)による浸水被害を低減するため、雨水貯留施設整備などのハード対策と、降雨や幹線水位などの観測情報を活用した施設の効率的運用などのソフト対策を併せた、総合的な雨水対策が推進されている<sup>1)</sup>。

雨水ポンプの制御は、基本的かつ重要な雨水対策の要素技術であり、従来、所定の起動水位と停止水位によるポンプ運転台数制御(以下、水位設定制御)が広く用いられてきた。水位設定制御においては、起動/停止水位の設定値が不適切な場合、これがポンプの発停頻度の増加(以下、チャタリング)や溢水の要因となるため、水位設定値の適正化は極めて重要である<sup>2,3)</sup>。特に、雨水ポンプ井容量が十分でない場合や、起動に3~5分程度かかる大容量の固定速ポンプなどの場合には、起動/停止の判断を誤ると溢水の可能性が著しく高まる<sup>9)</sup>。また、適切な起動/停止タイミングはポンプ場への流入量の多寡によっても変化する。そのため、大雨時などには、熟練運転員の経験に基づいて、手でポンプを起動/停止して運用していることも多い。流入量の変動に積極的に対応する方法として、文献4)~8)では、流入状態推定や流入量予測を用いたポンプの運用制御方法を提案している。特に、文献7)と文献8)は、水位設定制御を拡張した方法であり、降雨状況や流入量予測に基づいて起動/停止水位を

ファジィ推論などで補正する制御を提案し、文献7)では実際のポンプ場でその効果を実証している。この方法は水位設定制御のソフトを改良することで実現できる実用的な方法であるが、十分な効果を得るためには、起動/停止水位の基準値や水位補正量の調整が必要となり、汎用化は必ずしも容易ではない。別の方法として、文献9)~11)では、流入量予測や流出解析と最適化手法を用いて、ポンプの起動/停止の運転計画の最適化を図っている。文献9)や文献10)ではポンプの発停頻度を大幅に抑制できることを、文献11)では、発停頻度を増加させずにピーク水位を40%低減できることを、各々シミュレーションにより示している。これらの方法を用いると、ポンプの運転計画を最適化できるが、結果に大きく影響する評価指標の設定の自由度が大きく、また、最適化計算に一定の時間を要するため<sup>9)</sup>、実用化のためには、これらの課題の解決が不可欠である。

このような背景の下、本論文では、実際の雨水ポンプ場に汎用的に適用することを目的として、調整要素の少ない実用的な雨水ポンプ制御を提案し、その有効性を数値例により示す。本論文の構成は以下の通りである。2章では、提案する雨水ポンプ制御の概要を示す。この制御は、流入量予測を用いて適切なポンプの起動水位と停止水位を動的に変化させるものであり、水量収支に基づいて変化させることで、試行錯誤が必要となる調整要素を極力排除している。3章では、数値シ

ミュレーションにより、開発した制御の効果を検証し、水位設定制御と比較してピーク水位とポンプの起動停止回数を大幅に低減できることを示す。最後に4章では、本論文の結論をまとめる。

## 2. 雨水ポンプの動的水位設定制御

従来の水位設定制御は、予め設定した起動水位と停止水位に基づいて、雨水ポンプの発停を行う (Fig. 1)。制御則は単純であるが、チャタリングの抑制や溢水回避の観点で、起動水位や停止水位を慎重に設定する必要がある<sup>2,3)</sup>。また、固定された設定水位では流入量の変動に対応することが難しく、設定水位を動的に変更することが好ましい場合がある<sup>6,7,9)</sup>。

提案する制御は、動的な水位設定制御の一種であり、設定値の算出に際して、以下の定性的に知られている指針を水量収支に基づいて定量的に考慮する。溢水回避の視点では起動水位を低くする方が良く<sup>3)</sup>、チャタリング抑制のためには、各ポンプの起動水位と停止水位の差や複数のポンプの起動水位間の差は大きくする方が良い<sup>2)</sup>。起動水位を低くすると、設定水位間の差を十分に確保できなくなるため、溢水回避とチャタリング抑制は、概ねトレードオフの関係にある。さらに、チャタリングが発生すると、再起動に要する時間が長くなるため、低すぎる起動水位は、溢水回避の視点で

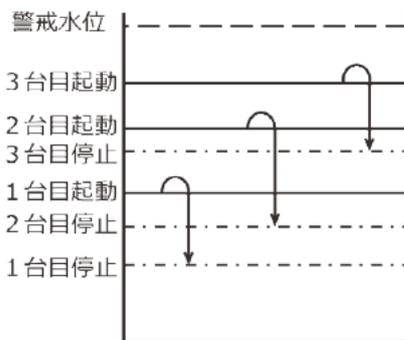


Fig. 1 水位設定制御 (ポンプが3台の場合の例)

も好ましいとは限らない。

Fig. 2は、流入量に応じてこの様なトレードオフの適正点を決定する基本的な考え方を、ポンプ1台の単純な場合で示したものである。まず、予測流入量を用いて、起動時間 (起動に要する時間) の間の積算流入量を推定し、上限基準水位 HH からこの量に相当する下方の水位を起動水位 Hon とする。この様にすると、例えば、HH を警戒水位とした時、積算流入量が正確であれば警戒水位を超えることは無いので、以下ではこの積算流入量を「溢水回避量」と呼ぶ。同様に停止時間の間の純流出量 (=ポンプ吐出量 - 流入量) の積算値を求め、下限基準水位 LL からこの量に相当する上方の水位を停止水位 Hoff とする。これにより、例えば、LL をインターロック回路が作動する水位とすると、停止時間内に水位が LL を下回りポンプが再起動できなくなる状態を回避できるので、この積算値を「ロック回避量」と呼ぶ。上下限からこれらの回避量を差し引くことで、運用上下限の範囲内で起動水位と停止水位の差を最大化でき、従って、溢水を回避しながら運転継続時間を最大化できる。また、起動時間は停止時間より長い場合が多く、溢水回避量とロック回避量は流入量に応じて変化するため、流入量が少ない時は起動水位と停止水位の差が自動的に広がり、流入量が多い時には自動的に起動水位が低下すると同時に停止水位も若干低下する。

提案する制御は、この考え方を複数台のポンプに拡張したものであり、Fig. 3に示したポンプが3台の場合の起動水位設定の例を用いて説明する。まず、N台目のポンプの溢水回避量をN-1台目までのポンプの起動を仮定した純流入量 (=流入量 - ポンプ吐出量) として定義する。Fig. 3左図では、上から順に3台目、2台目、1台目のポンプの溢水回避量である。次に、算出した各ポンプの溢水回避量を Fig. 3に示す様に積算し、Fig. 3左図の H1, H2, H3 に相当する水位を各々1台目、2台目、3台目のポンプの起動水位とする。各ポンプの溢水回避量を積算することで、N台

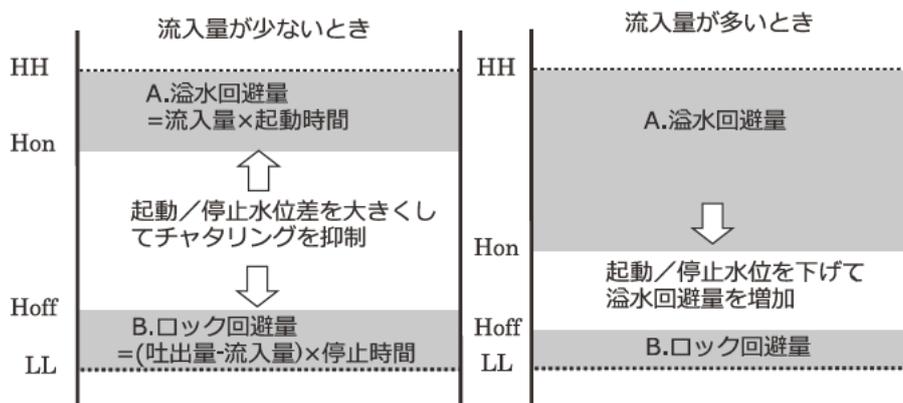


Fig. 2 ポンプが1台の場合の起動/停止水位の動的設定の考え方

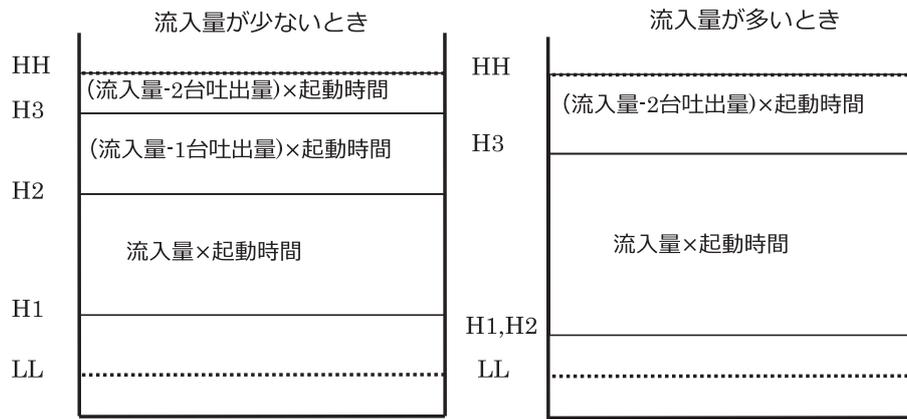


Fig. 3 ポンプが3台の場合の起動水位の動的設定の考え方

目のポンプ起動時に  $N-1$  台目のポンプが既に起動していることを保証できる。ただし、流入量が多くなると、起動水位が LL 未満になりうるので、その時は、Fig. 3 右図の様に同時起動を許容する様に修正する。Fig. 3 右図は、1 台目と 2 台目のポンプの同時起動を許容した例であり、この場合、Fig. 3 左図の 2 台目ポンプの溢水回避量が不要になり、H1 ~ H3 を LL より上側に設定できる。この様にすると、LL で全台起動しても溢水を避けられない過大な流入量でない限り、溢水しない様にポンプを起動できる。同様の考え方を停止水位設定にも適用したものが提案する基本的な制御則である。実務的な観点から、完全な同時起動の回避や起動水位 > 停止水位の保証、などの補正処理を加え、最終的に、以下の手順で動的に設定水位を算出する。

【動的起動／停止水位設定手順】

(1) 初期設定

上限基準水位 HH，下限基準水位 LL，同時起動回避のための起動水位間の最小水位差  $\Delta H_a$ ，起動水位と停止水位の最小水位差  $\Delta H_b$  を設定する。また、雨水ポンプ場の物理緒元を参考に、管内貯留分を考慮した雨水ポンプ井容量 (V) と雨水ポンプ井水位 (H) の関係 (V-H 関数) を求めておく。

(2) 溢水回避量／ロック回避量の算出

所定の制御周期毎に、流入量予測に基づき、各ポンプの溢水回避量／ロック回避量を算出し、LL ~ HH の上下限内に入る様に積算する (Fig. 3 参照)。

(3) 起動水位／停止水位換算

V-H 関数を用いて水位に換算し、各ポンプの起動／停止水位の暫定値を求める。

(4) 起動水位／停止水位の補正

同時起動のポンプがある場合や起動水位 < 停止水位となるポンプがある場合は、 $\Delta H_a$ 、 $\Delta H_b$  を用

いて補正し、最終的な起動・停止水位を設定する。

この制御則において、調整可能なパラメータは、HH, LL,  $\Delta H_a$ ,  $\Delta H_b$  の 4 つのみである。また、各パラメータの物理的な意味が明確であるため、パラメータ値と制御性能の関係も把握しやすく、経験や勘による膨大な試行錯誤を用いずに比較的容易に調整できる。次章の数値例では、その具体例を示す。

3. 数値シミュレーションによる有効性評価

提案した制御の効果を確認するため、実際の雨水ポンプ場の物理緒元を参考に仮想的な雨水ポンプ制御用のシミュレータを構築し<sup>12)</sup>、有効性を評価した。

3.1 シミュレーション条件

Fig. 4 に想定した対象の雨水ポンプ場の構造を示す。管渠内貯留を考慮し、ポンプ井最低水位 0 ~ 2.8 m の間は、貯留量が水位に比例し、2.8 ~ 5 m の間は、貯留量が水位の 2 乗に比例する貯留モデルを考える<sup>9), 12)</sup>。貯留量と水位の関係を Fig. 5 の様に定め、最高水位 5 m を警戒水位とした。計画流入量については、5 ~ 10 年確率降雨<sup>13)</sup>などを参考にして、計画降雨に合理式を適用して求め、ポンプの吐出量は計画流入量を排水できるように定めた (Table 1)。流入波形については、実際の流入量データを参考に、Fig. 6 に示す 2 つのピークを持つ波形 (上図：流入量 A) と典型的な降雨に対応する波形 (下図：流入量 B) を定め、流入量の最大値が Table 1 の計画流入量に一致する様に調整した。

ポンプの運用条件については、Table 1 に示す条件を用いた。溢水回避量やロック回避量を計算するための流入量の予測時間は、制御周期を考慮して、起動時間に制御周期分を加えたものとした。また、可調整パラメータの中で、LL,  $\Delta H_a$ ,  $\Delta H_b$  は、物理的意味を考慮して、予め Table 1 に示す値に固定し、HH につ

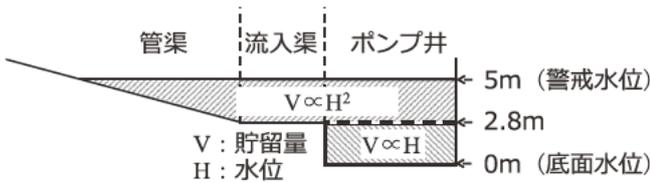


Fig. 4 管内貯留を考慮した雨水ポンプ場モデル

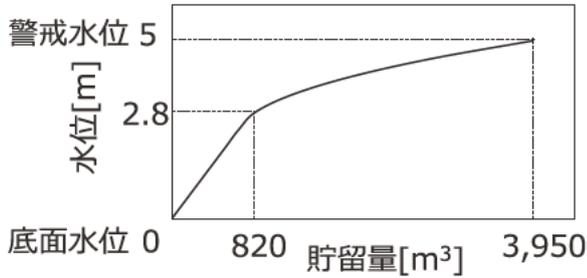


Fig. 5 雨水ポンプ場モデルの貯留量Vと水位HのV-H関数

Table 1 シミュレーション条件

	項目	記号	単位	条件
設定条件	計画降雨強度	Rd	mm/h	55
	流出係数	C	-	0.7
	排水区面積	A	ha	150
	計画流入量	Qd	m³/s	16.0
	ポンプ吐出量	Qo	m³/s	6.0
	ポンプ台数	N	-	3
運用条件	制御周期	Tc	min	1
	起動時間	Ton	min	3
	停止時間	Toff	min	2
	予測時間	Tp	min	4
	上限基準水位	HH	m	3.95 ~ 4.95
	下限基準水位	LL	m	0.0
	最小起動水位差	$\Delta Ha$	m	0.2
最小起動停止水位差	$\Delta Hb$	m	0.1	

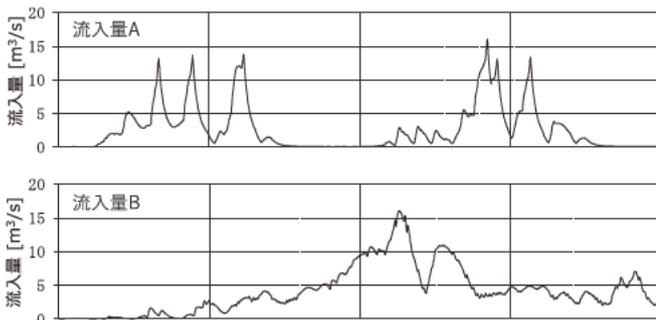


Fig. 6 評価に用いた流入量の波形

いては Table 1 に示す範囲で後述する調整を行った。

また、流入量予測については、ポンプ吐出量と水位変化率から流入量を逆算し、1制御周期前の流入量と計算時点の流入量から予測時間分を線形外挿する線形予測を採用した。これは、幹線水位やレーダ雨量などの流域情報を利用できない場合でも、ポンプ井水位とポンプ吐出量のみから算出できる簡単な予測方法であり、汎用的に利用できるためである。

### 3.2 評価方法

評価指標として、A. ピーク水位とB. ポンプの起動停止回数を採用し、以下の手順で評価した。

#### (1) パラメータの感度評価

上限基準水位 HH を 3.95 ~ 4.95 m の範囲で変化させ、A と B の評価指標の変化を調べ、評価指標に対するパラメータ HH の感度を評価した。また、この結果から、適切な HH の値を判断して設定した。

#### (2) 従来制御との比較評価

水位設定値の異なる3つの水位設定制御（C1 ~ C3）と提案制御を比較した。起動/停止水位の設定値は、以下の観点で決定し、その値を Table 2 の様に定めた。

C1：実際の雨水ポンプ場の起動/停止水位を参考に設定。

C2：警戒水位 5 m から下方に、計画流入量 × 起動時間の量に対応する水位を1台目の起動水位とし、各ポンプの起動水位間の容量が均等になる様に設定。停止水位はポンプの運転継続時間を延長する様に運用下限に近い点を設定。

C3：早めのポンプ起動を意図して、提案した制御則において予測流入量 = 計画流入量とした場合の設定値を算出し設定。

また、提案した制御則の潜在性能を評価するため、予測流入量 = 流入量として予測誤差が無い状態を仮定した制御（C4）についても併せて比較を行った。

Table 2 比較対象の水位設定制御の起動/停止水位設定値 [m]

条件	1台目		2台目		3台目	
	起動	停止	起動	停止	起動	停止
C1	3.25	2.65	4.05	3.05	4.25	3.25
C2	2.45	2.35	3.85	2.45	4.55	2.55
C3	2.45	2.35	2.65	2.55	2.85	2.75

### 3.3 結果と考察

#### (1) パラメータの感度評価結果

Fig. 7 は、上限基準水位 HH を 3.95 ~ 4.95 m の範囲で変化させた時のピーク水位とポンプの起動停止回数の関係を示したものである。評価指標の値は降雨や運用条件によってもばらつくため、Fig. 7 に示す様に流入量Aと流入量Bの2つの流入量で評価を行うと同時に、可調整パラメータ  $\Delta Ha$  を 0.2 ~ 0.7 m まで 0.05 m 刻みで変化させた場合の平均値を Fig. 7 の各点の値とした。Fig. 7 を見ると、ピーク水位は、上限基準水位 HH を警戒水位より若干下方にとると抑制されるが、下げすぎると逆に上昇することがわかる。これは、起動水位を上げすぎても下げすぎても溢水リスクが上昇することを間接的に示している。また、ポンプ起動

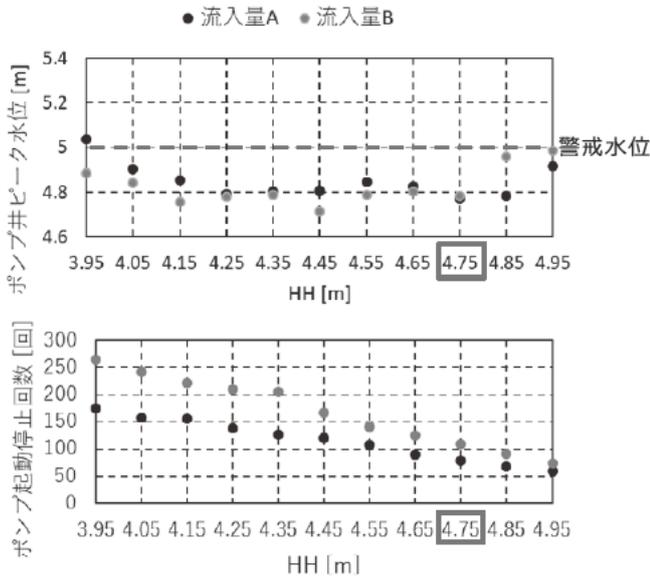


Fig. 7 上限基準水位 HH の設定値と評価指標 A および B との関係

停止回数については、HH を警戒水位に近づけると単調に減少する。これは、起動水位間の差や起動/停止水位間の差を大きくする方がポンプの運転継続時間を延長できることを間接的に意味している。このように、本制御では、パラメータの設定値と制御効果の関係について解釈が容易であり、パラメータの調整指針を立てやすい。

Fig. 7 の結果より、本数値例では、溢水リスクの低減とポンプの起動停止回数削減の両立を図れる値として HH = 4.75 m を採用した。

(2) 従来制御との比較評価結果

Table 3 は、2章で提案した制御と従来制御を、A. ピーク水位と B. ポンプの起動停止回数の評価指標で比較した結果をまとめたものであり、ピーク水位の括弧内の数値は警戒水位 5 m からの差を示している。また、提案した制御の潜在性能を併せて評価するため、予測流入量 = 流入量とした予測誤差が無い場合の結果も記載している。予測誤差が無い場合を C4、流入量を線形予測した場合を C5 としている。Table 3 を見ると、提案制御 C5 では、水位設定制御の C1 や C2 の条件と比較して、ポンプの起動停止回数が約 0.5 ~ 0.6 倍 (C1 に対して 0.52 倍 (流入量 A), 0.48 倍 (流入量 B), C2 に対して 0.57 倍 (流入量 A), 0.50 倍 (流入量 B)) となっている。さらに、C1 や C2 では、

Table 3 各制御手法による評価指標の比較

条件	ピーク水位 [m]		起動停止回数 [回]	
	流入量 A	流入量 B	流入量 A	流入量 B
従来 C1	5.30 (+0.30)	5.60 (+0.60)	162	237
従来 C2	5.14 (+0.14)	5.71 (+0.70)	148	228
従来 C3	4.95 (-0.05)	5.07 (+0.07)	386	555
提案 C4	4.68 (-0.32)	4.73 (-0.27)	84	110
提案 C5	4.96 (-0.04)	4.83 (-0.17)	84	113

ピーク水位が警戒水位 5 m を超過しているのに対し C5 では警戒水位以下を維持している。これは、ポンプ井底面 0 m から警戒水位 5 m までの容量を基準にして Fig. 5 の V-H 関数を用いて計算すると、C1 では 19.5% (流入量 A), 41.1% (流入量 B), C2 では 8.9% (流入量 A), 49.6% (流入量 B) の超過、提案制御 C5 では -2.4% (流入量 A), -10.1% (流入量 B) の削減に相当する。また、ポンプを早く起動することを優先した C3 と比較すると、C3 は提案制御 C5 よりもわずかにピーク水位を低減できる場合もあるが、起動停止回数が提案制御の 5 倍弱 (4.60 倍 (流入量 A), 4.91 倍 (流入量 B)) に増加している。実際にこのような頻繁な発停 (チャタリング) が生じるとポンプを起動できなくなるリスクが高まるので、C3 の制御は実用的でない。これらの結果から、提案制御はピーク水位の低減とチャタリングの抑制を両立できる制御であると言える。また、予測誤差が無い場合の提案制御 C4 と比較すると、提案制御 C5 はポンプの起動停止回数はほぼ同じであるが、ピーク水位は警戒水位 5 m に近づいているのに対し、予測誤差が無い C4 の場合には、ピーク水位をさらに低減できており、設定した上限基準水位 HH = 4.75 m よりも若干低く、警戒水位から 30 cm 程度低い水位で制御できている。これはポンプ井底面から警戒水位までの容量に対して -18.5% (流入量 A), -15.8% (流入量 B) の削減量に相当し、予測精度を向上させることで、本制御の効果をさらに高められる可能性を示唆している。そのため、幹線水位やレーダ雨量などの流域情報が活用できる場合は、これらの情報を用いて、機械学習などの方法を用いた高度な予測手法と組み合わせて本制御を適用することが好ましいと考えられる。

Fig. 8 と Fig. 9 は、流入量 A の場合の、提案制御 C5 (Fig. 8) と水位設定制御 C1 (Fig. 9) における、水位、流入量、および、ポンプ吐出量の時間変化を示したものである。これらを比較すると、Fig. 8 の提案

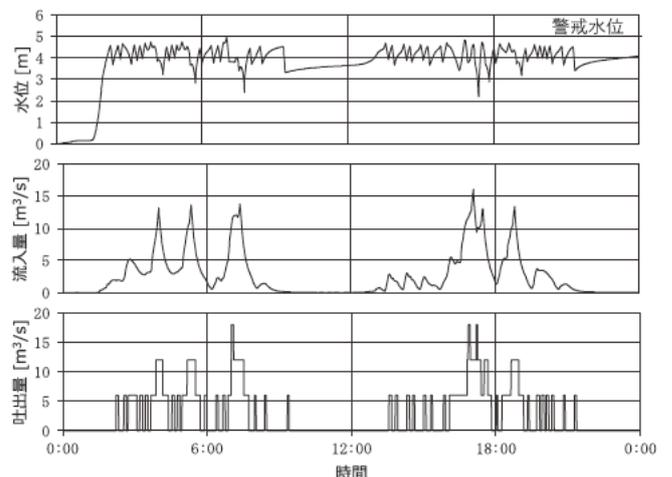


Fig. 8 提案制御 (C5) による制御結果例

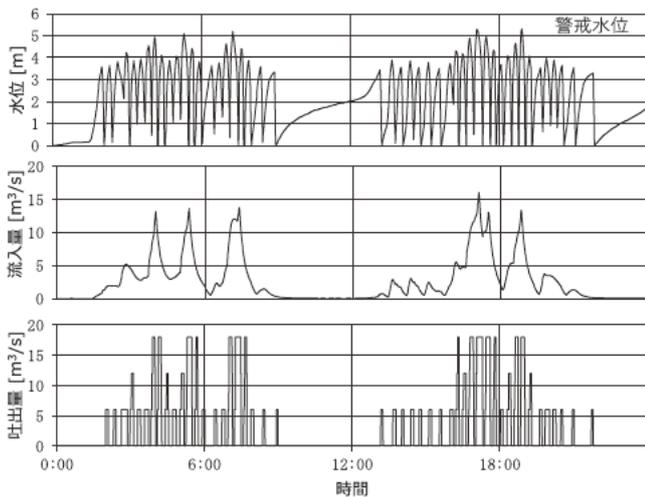


Fig. 9 従来の水位設定制御 (C1) における制御結果例

制御では、水位変動が抑制されてピーク水位が下がっていること、ポンプの吐出量の波形は流入量の波形と類似していることがわかる。従って、結果的に、提案した制御は、ポンプの起動/停止による遅れ時間があり、また、台数制御で離散的な流量しか吐出できない制約の中で、可能な限り吐出量を流入量に合わせながら、ピーク水位の上昇抑制とポンプの起動停止回数の削減を図る制御になっている。

#### 4. ま と め

本論文では、水位設定制御における起動/停止水位の設定値を、流入量予測を用いた水量の収支に基づいて動的に変化させる新しい雨水ポンプ制御手法を開発し、その効果を数値シミュレーションにより評価した。その結果、提案した制御は、従来の水位設定制御と比較して、ポンプの起動停止回数的大幅な削減とピーク水位の抑制を両立できる制御であることを示した。起動停止回数は、典型的な水位設定制御に対して0.5～0.6倍程度に削減できる可能性がある。ピーク水位は、線形予測による簡単な流入量予測を用いた流入予測誤差がある場合でも警戒水位未満に維持できる事を示した。また、流入量予測誤差が無い理想的な場合には、警戒水位より約30cm低下させることができ、流入量予測精度を向上させることで、溢水リスクを大幅に

低減できる可能性も示した。

今後は、機械学習を用いた高精度な流入量予測との併用の検討や、雨水ポンプ場モデル (V-H 関数) の不確かさに対するロバスト性評価などを行い、実際の雨水ポンプ場への適用を進めていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：雨水管理総合計画策定ガイドライン, [https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000698.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000698.html), (参照2022-06-15)
- 2) 田澤徹, 原田敏, 奥尾幸司, 祝部圭介：神嶽ポンプ場雨水ポンプの運転改善について, 下水道研究発表会講演集, No. 55, pp. 362-364 (2018)
- 3) 加藤光一：効果的な雨水排水ポンプの運転管理について, 名古屋都市センター研究報告書, No. 124, (2016)
- 4) 佐武昇, 伊藤修, 小林和彦, 柳下修：適応形ファジーコントローラによる雨水ポンプの協同制御. 電気学会論文誌C, Vol. 109, No. 5, pp. 361-366 (1989)
- 5) 中山明夫, 倉持昭人, 時盛孝一：流入量予測ポンプ自動運転システム, EICA, Vol. 10, No. 2, pp. 30-33 (2005)
- 6) 山田文隆, 戸辺安記, 大島信夫, 古畑良国, 杉山利一：ファジー制御による雨水ポンプ運転制御の自動化, EICA, Vol. 7, No. 2, pp. 15-17 (2002)
- 7) 社本孝寛, 寺尾行喜, 長岩明弘, 平岡由紀夫, 名里敦司, 初鹿行雄：ファジー制御を応用した雨水ポンプ制御システムの実用化. 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 121, No. 4, pp. 468-475 (2001)
- 8) 君島和彦, 片山恭介, 小野洋一, 梅田賢治, 近藤真哉：合流改善を考慮した雨水ポンプ制御システム. EICA, Vol. 10, No. 2, 26-29 (2005)
- 9) 山川聡子, 吉本國春：予測流入量を用いた雨水処理場ポンプの最適運転計画, 第52回自動制御連合講演会講演論文集 pp. 184-184 (2009)
- 10) H. Wang, X. Lei, S. T. Khu and L. Song: Optimization of Pump Start-up Depth in Drainage Pumping Station Based on SWMM and PSO. Water, Vol. 11, No. 5, 1002 (2019)
- 11) J. Yazdi, H. S. Choi and J. H. Kim: A Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Urban Drainage Systems, Journal of Hydro-environment Research, Vol. 11, pp. 101-112 (2016)
- 12) 時本寛幸, 山中理, 鳴海啓太：起動・停止水位の動的設定により浸水リスク低減を図る雨水ポンプ制御技術, 第58回下水道研究発表会講演集, pp. 338-340 (2021)
- 13) (公社) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 (前編) — 2019年版一, pp. 214-223, (2019)