

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月21日現在

機関番号：32663

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760338

研究課題名（和文）都市における雨水流量予測と排水ポンプの予測制御に関する研究

研究課題名（英文）Study on prediction of the inflow rate and predictive control of the pumps in storm water pump stations

研究代表者

山川 聡子（YAMAKAWA SATOKO）

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：20293748

研究成果の概要（和文）：全国各地で発生している都市型水害への対策が求められている。本研究では既存の排水施設の有効かつ合理的な活用のため、入手が容易なデータにもとづいて雨水ポンプの運転計画を行うことを目指した。気象庁が一般に公開している降水ナウキャストデータと、過去のポンプ場の水位変化とポンプの排水量を用いて、将来の流入量、または水位を予測するモデルを作成した。予測した水位にもとづいて複数台のポンプの運転計画を算出するプログラムを作成した。実際にいくつかのポンプ場で測定されたデータを用いて数値シミュレーションを行い、本手法の効果を考察した。

研究成果の概要（英文）：Recently, torrential rains are observed all over Japan and urban areas often suffer from floods. The effective use of current equipments is expected to cope with these floods. The purpose of this study is to propose a method for making plans for operating the pumps of storm water pump stations only from easily accessible data. The water level and outflow data are already measured in many pump stations and the rain prediction data will be obtained from Nowcast data, which are publicly provided by Japan Meteorological Agency. In this study, a linear ARX model was used for predicting the future water level and the parameters of the model were recursively identified. The optimization problem was formulated and the program for calculating the optimal plan of operating water pumps was constructed. The proposed method was evaluated in numerical simulations by using actually measured data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御工学，予測制御，雨水ポンプ場，線形近似モデル，組み合わせ最適化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、全国各地で激しい降雨が観測され、大都市では都市型水害が発生している。都市型水害に効果的に対処する方法としては、雨

水管の増強，雨水バイパス管や雨水貯留管・貯留施設の設置，さらには雨水ポンプの能力アップなどがある。しかし，これらの施設を充実させるには膨大な費用がかかるため，既

存の排水施設を有効かつ合理的に活用することが期待されている。

都市に降った雨の多くは、雨水管を通して地域の排水施設へ流入する。排水施設では、この流入量に合わせてポンプを作動させて雨水を河川等へ排水し、対象区域の浸水を防ぐ。排水施設で用いられる大揚水量ポンプは、起動信号を受けてから吐出を開始するまでに数分を要するものもある。そのため、ポンプの起動、停止の判断を誤ると溢水する可能性がある。雨水ポンプの運転は、流入量の変化や天気予報などにもとづいて、管理者が経験的に行っていることが多い。経験ある操作者の高齢化が進むにつれ、ポンプ運転の自動化の必要性はより高まると考えられる。最適なポンプ運転を行うためには、ポンプ場への雨水流入量をリアルタイムで予測する手法が強く求められている。

## 2. 研究の目的

都市部においては、降雨がポンプ場へ流入するまでの時間が比較的短い。そのため、過去の降雨観測データだけから流入量予測を行うことには限界があると思われる。配水管の途中の流量を計測する方法などもあるが、この方法は設備投資がかかる。本研究では、気象庁が提供している「降水ノウキャスト」による予測降雨データに着目する。降水ノウキャストでは、全国を対象に1 km四方ごとに60分先までの将来降雨量の予測値が提供されている。このデータを用いることで、新たな設備投資を最小限に抑え、排水施設への流入量、およびポンプ場の水位を予測する。

流入量変化に対してポンプの排水が間に合わずに溢水すると、ポンプ場の設備が浸水して莫大な損失を引き起こす可能性がある。一方で、ポンプ井の水位が低い状態でポンプを作動させると、空運転を引き起こしてポンプの寿命を縮めることになり、望ましくない。したがってポンプ井の水位は適正な範囲にとどめておく必要がある。排水施設には、複数台のポンプが設置されており、多くの場合、異なる種類、揚水量のポンプが混ざっている。そこで、ポンプ場の水位を適正に保つために、予測した将来のポンプ場の水位にもとづいて複数台のポンプの効率的な運転計画を提供することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 流入量と水位予測モデル

ポンプ場のデータは多くの場合、ある時間間隔で観測される。この観測時間の間隔を $\Delta$ とする。時刻 $(i-1)\Delta$ から $i\Delta$ までのポンプ場への平均雨水流入量を $y(i)[m^3/s]$ で表わす。雨水

ポンプの台数を $n$ とし、時刻 $(i-1)\Delta$ から $i\Delta$ までの $j$ 番目のポンプの平均排水量を $z_j(i)[m^3/s]$ とする。このとき、時刻 $i\Delta$ でのポンプ井の貯水量 $H(i)[m^3]$ と、流入量、排水量の関係はつぎの式で表される。

$$H(i) = H(i-1) + \Delta(y(i) - \sum_{j=1}^n z_j(i)) \quad (1)$$

なお、以下ではポンプの合計排水量を

$$z(i) = \sum_{j=1}^n z_j(i) \quad (2)$$

とおく。ポンプの排水量は、ポンプの運転状況とポンプの特性曲線から近似的に算出することができる。

ポンプ井の貯水量 $H(i)$ とポンプ井の水位 $h(i)$ の関係は、ポンプ井の断面形状などで決まる。この関係、

$$h(i) = f(H(i)) \quad (3)$$

が得られれば、(1)式を用いて流入量と排水量からポンプ場の水位が算出できる。

ところで、ポンプ場への雨水の流入は、排水区域に降った過去の雨によって生じる。雨水管内の流速は、雨水管に流れ込む雨の量や、雨水管に溜まっている過去の雨水によって変化する。さらに、ポンプの作動状況によっても変動する。このように、降雨とポンプ場への流入量の関係は、複雑で非線形、かつ時変であるため、その関係を正確に表わすモデルを作成することは困難である。加えて詳細なモデルが作成できたとしても、雨水管の増設や経年変化などによって特性が変化する可能性がある。しかし、ポンプ場の水位は排水区域への過去の降雨、ポンプの排水量、および過去の水位変化に依存することは確からしい。そこで、本研究では流入量 $y$ と水位 $h$ と排水量 $z$ 、降雨 $u$ の関係を単純な線形のARX(Auto Regressive Exogenous)モデルで近似的に表わす。

$$h(i) = \sum_{l=1}^{N_a} a_l h(i-l) + \sum_{l=0}^{N_b} b_l u(i-l) + \sum_{l=0}^{N_c} c_l z(i-l) \quad (4)$$

ここで、 $u(i)$ は時刻 $(i-1)\Delta$ から $i\Delta$ までの降雨量[mm]である。また、 $N_a, N_b, N_c$ はモデルの次数であり、使用者が決定する。モデルのパラメータ $a_1, a_2, \dots, a_{N_a}, b_0, b_1, \dots, b_{N_b}, c_0, c_1, \dots, c_{N_c}$ は、対象区域で過去に観測されたデータから同定する。

なお、対象とする排水区域が広い場合には、区域内の降雨変化に対応するために数ヶ所の降雨データの利用を検討する必要があるだろう。その場合は、式(4)の $b_l u(i-l)$ の代わりに、複数の場所の降雨データを並べたベク

トル  $\mathbf{u}(i-l)$  と同じ要素数を持つパラメータベクトル  $\mathbf{b}_l$  の積,  $\mathbf{b}_l^T \mathbf{u}(i-l)$  を用いることで同様に扱うことができる。

### (2) モデルパラメータ同定

対象区域で測定されたデータを用いて逐次同定を行うことで, あらかじめ計測しておくパラメータを減らすことができる。また, 異なる地域でも適用可能な手法になることが期待できる。

現時刻  $i\Delta$  よりも過去の時刻  $q\Delta$  を考える。時刻  $q\Delta$  での水位の予測値  $\hat{h}(q)$  は, (4)式より, つぎのように表される。

$$\hat{h}(q) = \sum_{l=1}^{N_a} a_l h(q-l) + \sum_{l=0}^{N_b} b_l u(q-l) + \sum_{l=0}^{N_c} c_l z(q-l) \quad (5)$$

モデルパラメータ  $a_l, b_l, c_l$  を予測誤差  $e(q) = \hat{h}(q) - h(q)$  の二乗和が最小になるように決定する。すなわち, 評価関数,

$$J = \sum_{q=0}^i (r^{i-q} e(q))^2 \quad (6)$$

を最小にするように, 逐次最小二乗法を用いてパラメータを同定する。ただし,  $r$  は最新のデータに重みをおくための忘却係数であり,  $r \leq 1$  の定数である。

### (3) 水位予測

同定したパラメータをモデル(4)に代入して  $T_p$  ステップ先までの将来の水位を予測する。このとき, 時刻  $i\Delta$  までに得られない値については予測値や計画値を用いる。まず, 降雨の予測値は降水ナウキャストのデータを用いる。降水ナウキャストで得られる時刻  $j\Delta$  での降雨の最新の予測値  $\tilde{u}(j)$  は,

$$\tilde{u}(j) = \begin{cases} u(j-1), & j \leq i \\ u(i, j-i), & j > i \end{cases} \quad (7)$$

である。ここで,  $u(q, j)$  はナウキャストが時刻  $q\Delta$  において  $(q+j-1)\Delta$  から  $(q+j)\Delta$  までの降雨量を予測した値である。

時刻  $i\Delta$  以降のポンプ排水量についてはポンプの運転計画値を用いる。時刻  $(i+T_p)\Delta$  までのポンプ排水量の計画値を

$$\mathbf{z}_p(i) = (z_p(i+1), z_p(i+2), \dots, z_p(i+T_p))^T \quad (8)$$

とする。

水位については, 現時刻  $i\Delta$  までの水位は観測値, それ以外は予測値を用いる。  $k$  ステップ先の水位の予測値は,

$$\begin{aligned} \hat{h}(i+k) = & \sum_{l=1}^{k-1} a_l \hat{h}(i+k-l) + \sum_{l=k}^{N_a} a_l h(i+k-l) \\ & + \sum_{l=0}^{N_b} b_l \tilde{u}(i+k-l) \\ & + \sum_{l=0}^{k-1} c_l z_p(i+k-l) + \sum_{l=k}^{N_c} c_l z(i+k-l) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ただし,  $1 \leq k \leq T_p$  である。なお, 時刻  $(i+2)\Delta$  の水位予測の計算には, 時刻  $(i+1)\Delta$  の予測値  $\hat{h}(i+1)$  が必要である。したがって, (9)式を用いた予測値の計算は  $k=1$  から  $k$  を1ずつ増やしながら順に行う。

### (4) ポンプの最適運転計画

水位の予測値(9)は, 将来のポンプの排水量  $\mathbf{z}_p(8)$  に依存して変化する。そこで, 将来のポンプ井水位を改善するようにポンプの最適運転計画を行う。雨水ポンプは排水量を連続的に変化させることが可能なものもあるが, 弁を最大に開放し, 細かな制御を行わないことも多い。そこで, 連続的な制御は考えず, ポンプ起動/停止のスイッチの切替えタイミングの最適化について考える。時刻  $i\Delta$  での  $j$  番目のポンプのスイッチの状態を  $d_j(i)$  とし,

$$d_j(i) = \begin{cases} 1, & \text{switch on} \\ 0, & \text{no action} \\ -1, & \text{switch off} \end{cases} \quad (10)$$

と定義する。排水量はスイッチを切替えても, 瞬時に最大もしくは0にはならない。スイッチを入れた直後の  $j$  番目のポンプの排水量を  $z_{\text{inc}j}$  とする。起動は1ステップで終了するとし, その後はスイッチを切るまで最大値  $z_{\text{max}j}$  を排水する。スイッチを切ると1ステップ内で停止し, その間の排水量は  $z_{\text{dec}j}$  であるとする。すなわち,  $j$  番目のポンプの排水量はスイッチの状態の履歴に応じて,

$$z_j(i) = \begin{cases} \begin{cases} z_{\text{max}j}, & d_j(i-2) = 1 \\ z_j(i-1), & d_j(i-2) = 0 \end{cases}, & d_j(i-1) = 0 \\ \begin{cases} 0, & d_j(i-2) = -1 \\ z_{\text{inc}j}, & d_j(i-1) = 1 \\ z_{\text{dec}j}, & d_j(i-1) = -1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

となる。

以上より,  $n$  台のポンプのスイッチ状態  $d_j(i)$  を決めると水位の予測値が計算できる。特に, 時刻  $i\Delta$  以降でポンプのスイッチを切替えない場合, すなわち  $d_j(i+l) = 0, l = 0, 1, \dots, k-1$  とした場合の時刻  $(i+k)\Delta$  での予測水位を  $\hat{h}_0(i+k)$  で表わす。

本研究では将来のポンプ井水位  $h$  の変動を

抑えるポンプの運転計画を考える。ポンプ井の水位の基準値  $h_d$  に対して、 $T_p$  ステップ先までの水位の誤差の二乗和を評価関数とする。この評価関数を最小にする  $d_j(i), \dots, d_j(i+T_p-1)$  の組み合わせを求める。時刻が進むごとに流入量の予測値が更新されるので、予測制御における *Receding horizon* 法のように、時刻  $i\Delta$  では得られた最適解のうち、 $d_j(i)$  のみを採用し、時刻  $(i+1)\Delta$  ではあらためて計算しなおす。

ところで、常にポンプ井の水位を基準値に保とうとするとポンプの起動/停止が頻繁に起こる。ポンプの起動には予備運転が必要な場合もあり、頻繁な起動/停止はエネルギー効率が悪い。一方、ポンプ井の貯水量には余裕があるので、ポンプの作動遅れによる多少の水位変化は許容できる。実際に人が運転を行う場合でも、ある程度水位が変化してからポンプの起動を行うことが多い。そこで、現状を維持したときの  $T_p$  ステップ後の予測水位  $\hat{h}_0(i+T_p)$  が安全範囲内の水位ならば、最適化を行わずに現状を維持する。そうでなければ、最適化計算を行ってポンプの運転状態を変更することにする。

以上より、最適化問題をつぎのように定式化した。

#### 《最適化計画》

ポンプ井水位の基準値を  $h_d$  とし、運転を行わない水位の上限を  $h_d + \delta_h$ 、下限を  $h_d - \delta_l$  とする。ポンプのスイッチを切替えない場合のポンプ井水位の予測値  $\hat{h}_0(i+T_p)$  に応じて、ポンプのスイッチの状態  $d_j(i)$  を

$$\begin{aligned} & \text{if } h_d + \delta_h > \hat{h}_0(i+T_p) > h_d - \delta_l \text{ then} \\ & \quad d_j(i) = d_j(i-1) \\ & \text{else} \\ & \quad d_j(i) = \hat{d}_j(i), \end{aligned}$$

と選ぶ。ただし、 $\hat{d}_j(i+k)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $k = 0, 1, \dots, T_p - 1$  は、評価関数、

$$\min_d J(i) = \sum_{k=1}^{T_p} (\hat{h}(i+k) - h_d)^2 \quad (12)$$

を最小にする値である。□

#### (5) 最適化計算の時間短縮

評価関数(12)の最小化問題は、 $d_j(i)$  の組み合わせ最適化問題である。この計算はポンプ台数  $n$  と評価ステップ  $T_p$  の増加に対して組み合わせ爆発を起こす。そこで、分枝限定法を用いた計算時間の短縮を行った。また、頻繁な切替を行うポンプ運転は消費電力などの点

からもあまり望ましい運転ではない。そこで、スイッチの切替えは最初の時刻  $i\Delta$  でのみ行い、その後はポンプの状態を維持する解に限定し、評価関数(12)を最小にする解を求めた。これを準最適解と呼び、最適解と比較した。

#### (6) シミュレーションによる検証

東京都や大牟田市など、複数のポンプ場で2005年から2011年の間に実測されたデータを用いてシミュレーションを行い、提案手法について検討を行った。

まず、水位予測はモデル(4)の次数が低すぎると、モデル化の近似誤差が大きく、十分な予測精度は得られない。逆に次数が高すぎると観測雑音に敏感なモデルが得られる傾向がある。降雨予測値を用いないARモデル( $N_b=0$ )と比較すると、降雨予測を用いることで予測値のピークの値が減少し、測定値に近づく傾向が得られた。特に、忘却係数  $r$  を小さくすることで、ARモデルの場合とは異なり、行きすぎ量ピークの値が抑えられて予測が改善される傾向があった。過去のデータの重みを小さくすることで、降雨予測データに応じてパラメータが変動しやすくなり、急な降雨のような状況変化に対応できたといえる。しかし、 $r$  を小さくしすぎると予測値の変化が振動的になり、測定値との差が大きくなるがあった。

水理学などで用いられている流出係数を参考に降雨量の非線形関数項を(4)式に組み込み、予測誤差の軽減の可能性も検討した。しかし、シミュレーションで比較した結果、検討した非線形項については、線形モデルの次数を増やすほどの効果が得られなかった。

つぎに、ポンプの最適運転計画の数値シミュレーションを行った。まず、将来の流入量が正確に予測できた場合を想定し、測定された流入量の時間をずらして予測値として用いたシミュレーションを行った。図1に示すように、ポンプの運転状況を変更するための閾値  $\delta_h = \delta_l$  を0として最適化を行った場合は水位がほぼ一定に保たれた。ただし、このとき、ポンプは頻繁に切替えられていた。一方、閾値を大きくすると、水位変化は大きくなるが、ポンプの切替え回数が減少した。

閾値が小さい場合は、評価する範囲  $T_p$  が小さいほど目標値に近づいた。一方、閾値が大きい場合に  $T_p$  を1にすると逆に目標値からのばらつきが大きくなった。閾値を大きくすると、目標値からある程度離れそうになったときにだけポンプ運転を変更する。このときに  $T_p$  が小さいと、目標値から離れた分を急激に戻そうとする解が選ばれるので、行き過ぎを生じてしまうと考えられる。したがって、ポ

ンプの切替えを減らすために閾値を大きくする場合は、ある程度長期間で評価するほうが良いといえる。

準最適解では計算時間が 1/3 程度に短縮された。このときの水位変化は最適解の場合と同程度であった。計算時間を短縮するためには準最適解でも十分だと考えられる。

計算した予測流入量を用いた場合の結果を図 2 に示す。予測値に遅れがある区間で水位変化が大きくなった。しかし、ポンプ運転の閾値をある程度小さく選ぶことで、人が運転した場合と同程度の水位変化に抑えられた。

最適運転を行った場合のポンプ運転の様子を図 3 に示す。人が運転した場合に対して、最適化を行った場合はポンプを小刻みに起動/停止させる結果となった。また、人の運転に比べて、大揚水量ポンプをあまり使わない解が得られた。これは、水位変化の評価関数を小さくするために、小さなポンプを用いて微調整を繰り返しているためだと考えられる。閾値  $\delta$  を大きくすると起動/停止の回数が抑えられた。

#### 4. 研究の成果

本研究では、降雨の予測値を用いたポンプ場水位の予測手法を提案した。本手法で用いるデータは公開されている降水ナウキャストの予測データ、およびポンプ場水位と排水量である。水位や排水量はすでに測定されていることが多く、入手が比較的容易なデータである。雨天時と晴天時ではモデルパラメータの違いがあるが、逐次モデルパラメータを同定して更新することで、状況に関わらず統一的に予測を行うことができる。

実際に測定されたポンプ場の水位と排水量データを用いたシミュレーションによって、降雨量の予測データを用いることで予測誤差が改善されることを確かめた。予測モデルの次数および忘却係数を調整することで、予測誤差が改善された。ポンプ場や排水区の詳細データを用いない簡易的な方法であっても、水位予測を行える可能性が得られた。今後、降水ナウキャスト予測の精度が上がれば、水位の予測精度も上がるのが期待できる。

ポンプ場への予測流入量にもとづいて、雨水ポンプの最適運転計画を行った。流入量予測が正確であれば、将来の水位をほぼ一定に保つ解が得られた。最適化計算を行うための閾値を設けることで、ポンプ運転の切替頻度を抑えられる可能性を示した。

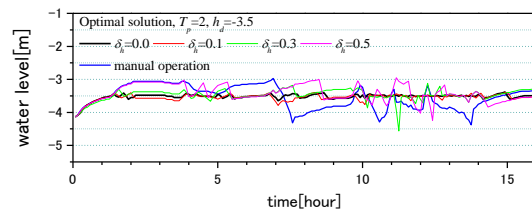


図 1 将来の流入量が分かっている場合の最適運転時の水位変化

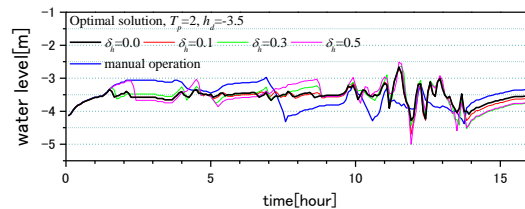


図 2 予測流入量にもとづいた最適運転時の水位変化

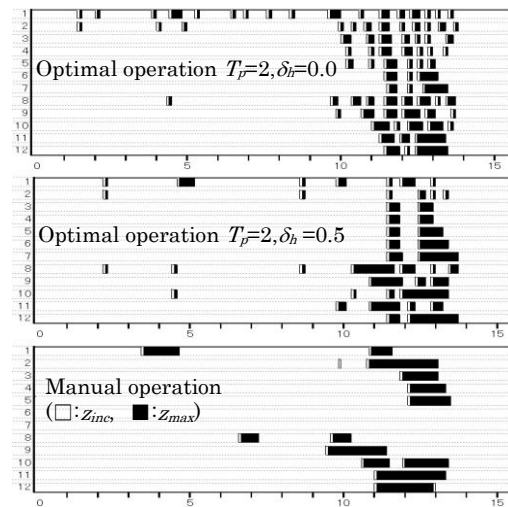


図 3 水位を保つための最適運転と人の操作の比較

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 山川聡子, 吉本国春, ARX モデルを用いた雨水ポンプ場の水位予測, 下水道協会誌論文集, 査読有, Vol. 48, No. 587, pp. 110-116 (2011)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Satoko YAMAKAWA, Tracking Control of Wheeled Inverted Pendulum Based on the Time-state Control Form, Preprints of the 18th IFAC world congress, ThA20/6, 2011/9/11 (Milano)
- ② 山川聡子・吉本国春, 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, 2009/11/22 (大阪大学)

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者

山川 聡子 (YAMAKAWA SATOKO)

東洋大学・理工学部・准教授  
研究者番号：20293748

(2) 研究分担者 (0)

(3) 研究協力者 (0)