

雨水対策を支援するシステム技術

System Technologies for Urban Drainage

永森 泰彦

片山 恭介

■ NAGAMORI Yasuhiko

■ KATAYAMA Kyosuke

河川放流水質を良好に保つ水環境の維持・改善と、浸水被害の回避や雨天時の河川放流負荷量削減（合流改善対策）などの雨水対策は、下水道施設の重要な役割である。東芝はこれまで、計測・制御技術、シミュレーション技術、予測技術、最適化技術などのシステム技術を基盤として、下水道施設を効率的に運用しながら水環境の維持・改善と雨水対策を行う各種システム技術を開発してきた。

ここでは、流入予測情報を用いた制御方法を導入することによって、浸水リスク低減と放流負荷削減を両立させる雨水ポンプ制御システムと、流入水の水量と水質の変動に対応して最適塩素注入率を演算し、放流水中に含まれる残留塩素を抑制する塩素注入制御システムについて述べる。

Sewerage facilities are required to reduce the effluent load on receiving water bodies such as rivers and to prevent urban flooding as well as overflowing of combined sewers. Toshiba has been developing and supplying various advanced operational control systems to support the efficient operation of sewerage facilities, based on system technologies such as instrument and control, simulation, prediction, and optimization technologies.

This paper addresses the subjects of chlorine injection rate control for residual chlorine reduction, and drainage pump control in a combined sewer facility for simultaneous prevention of flooding and combined sewer overflow.

1 まえがき

汚水と雨水を同一の管に流して処理する合流式下水道は、晴天時の公共用水域への汚濁負荷低減と雨天時の浸水対策を同時に行う方式であり、早くから下水道整備に着手してきた多くの都市で採用され、快適で安全な生活を支えてきた。しかし近年、雨天時における合流式下水道から放流される未処理下水が公共用水域へ与える影響が懸念されており、この問題への対策（合流改善対策）に社会的関心が高まっている。

合流改善対策の一つとして、公共用水域へ放流される未処理下水の放流回数を半減することが目標にあげられ⁽¹⁾、ポンプ場では浸水対策に加えて、河川への放流量を低減することが求められている。また、放流される未処理下水に対しては消毒処理が有効であるが、残留消毒剤による水生生物への影響が懸念されることから、放流先の生態系に配慮した消毒手法が望まれている⁽¹⁾。

東芝は、計測・制御技術、シミュレーション技術、予測技術、最適化技術などを基盤として、雨水対策を行う各種システム技術を開発してきた。

ここでは、この中から、浸水リスク低減と放流負荷削減を両立する雨水ポンプ自動制御システムと、放流水域の環境に配慮した塩素注入制御システムについて述べる。

2 浸水リスク低減と放流負荷削減を両立する雨水ポンプの自動制御システム

従来の雨水ポンプ制御は浸水リスクを回避することを重視していたため、小雨時の河川への雨水放流により放流負荷が高くなるという課題があった。当社は、図1に示すような合流式下水道のポンプ場を対象として、下水道管からの溢水（いっすい）の危険を増大させないという条件の下で、

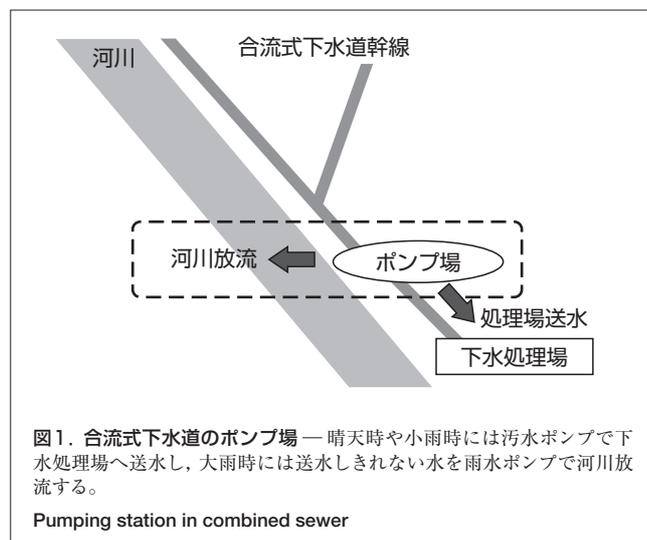


図1. 合流式下水道のポンプ場 — 晴天時や小雨時には汚水ポンプで下水処理場へ送水し、大雨時には送水しきれない水を雨水ポンプで河川放流する。

Pumping station in combined sewer

小雨時には下水道管やポンプ場の貯留能力を最大限に活用して河川への放流負荷を削減する雨水ポンプ自動制御システムを開発した⁽²⁾。その概要とシミュレーションによる評価結果について以下に述べる。

2.1 雨水ポンプ自動制御システムの概要

雨水ポンプの自動制御では、ポンプ井水位計測値があらかじめ決められた設定水位に達した時にポンプの起動・停止を行う手法が一般的である。開発した雨水ポンプ自動制御方法は、この設定水位制御をベースとし、降雨量や流入量予測に応じて運転モードを切り替え、雨水ポンプの起動設定水位を次のように補正することが特徴である。

- 補正1 大雨モードでかつ急激な雨水流入が予測される場合には、通常モードよりも起動・停止設定水位を下げる。
 補正2 合流改善モードの場合には、通常モードより起動・

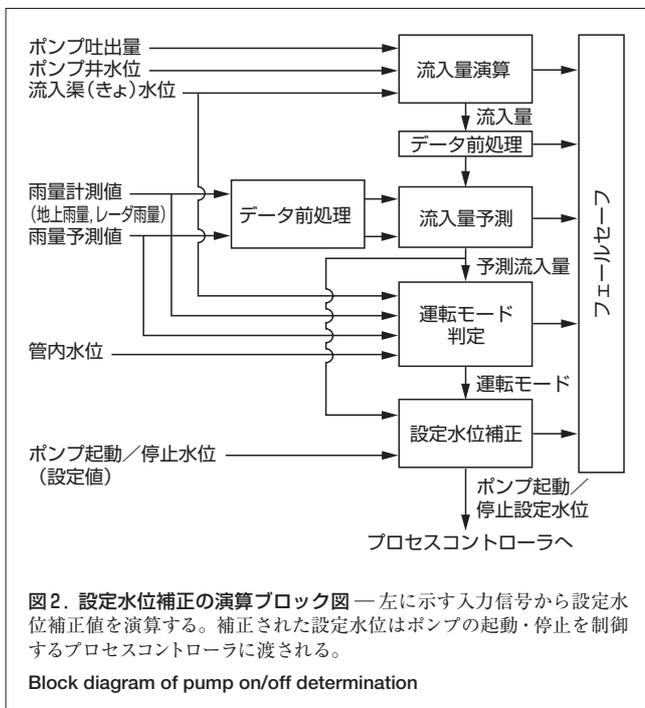


表1. 設定水位補正のための演算ブロックの機能概要

List of functions of calculation blocks

演算ブロック	機能概要
データ前処理	入力データの異常値処理やフィルタリング処理を行う。
流入量演算	ポンプ場への流入量を演算する。
流入量予測	ポンプ場への流入量予測値を演算する。予測モデルにはシステム同定法 ⁽²⁾ を採用している。
運転モード判定	合流改善モード、通常モード、大雨モードのいずれかのモードを選択する。
設定水位補正	あらかじめ設定されているポンプ起動及び停止設定水位を補正する。
フェールセーフ	計測値や予測値のしきい値設定に基づき、システムの安全運用範囲を超えるとアラームを出す。

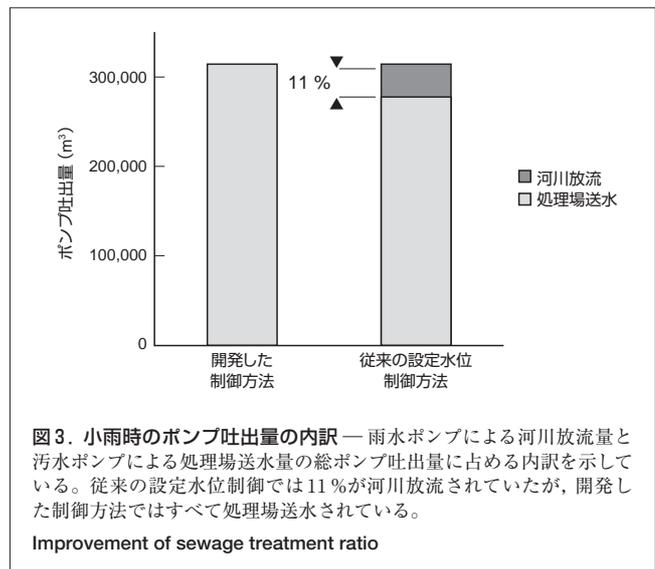
停止設定水位を上げて、高汚濁負荷の水を貯留する。

補正のポイントは、ポンプ場の土木構造から予測流入量を水位の上昇分に換算し、その上昇分を打ち消すようにポンプの起動・停止設定水位の補正値を計算する点である。

設定水位補正演算の流れを図2に、また、各演算ブロックの機能概要を表1に示す。

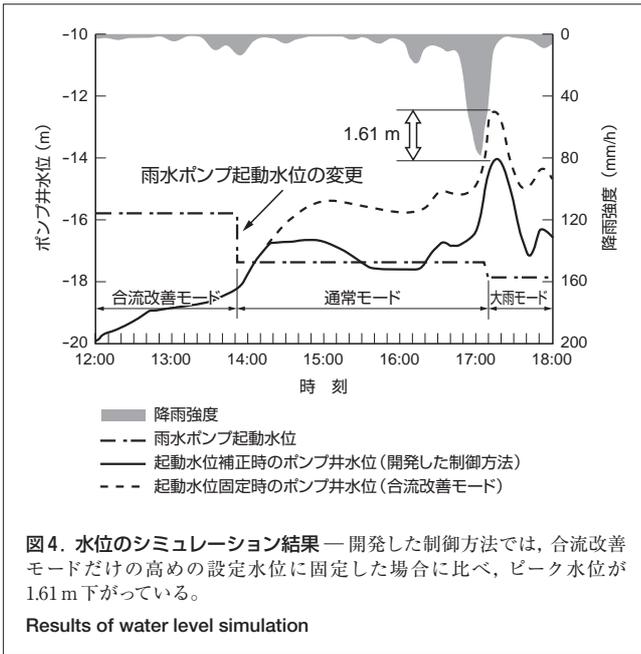
2.2 シミュレーションによる評価

小雨時の河川放流量について、開発した制御方法による削減効果の一例を図3に示す。従来の設定水位制御では河川放流されていた11%の量が、開発した制御方法ではすべて処理場送水されている。これは、設定水位を高めに補正することで雨水ポンプが起動しなかったことによる。河川放流量が削減されるので、結果として放流負荷削減につながる。



小雨から次第に雨が強くなった場合のポンプ井水位のシミュレーション例を図4に示す。このような場合、小雨時の合流改善を意図してポンプ起動水位を高めに固定すると、最初に下水道管内に貯留した水を排水しきれず、ポンプ井などの水位が上昇し、浸水リスクが高まることが懸念される。しかし、開発した制御方法では、初めは合流改善モードにより起動設定水位を上げる方向に補正されていたが、流入量予測情報などに基づいて、通常モード、続いて大雨モードに切り替わり、起動水位設定値を下げる方向に補正される。その結果、合流改善モードだけで運用することを想定した場合と比較して、雨水ポンプが早く起動することでポンプ井ピーク水位が下がるので、浸水の危険が低減する。

このように、開発した制御方法は河川への放流負荷削減と浸水リスク低減の双方に有効であることが、シミュレーションにより定量的に評価できた。今後は、実機場での評価を進めていくとともに、更なる放流負荷削減を目指し、水質計測



値を利用してより効果的に雨水貯留を行う制御方法や、河川流域全体の浸水リスク低減と放流負荷削減を考慮して複数のポンプ場が相互に連携した雨水ポンプ制御の開発を進めていく。

3 環境に配慮した合流下水の塩素注入制御システム

合流式下水道では、雨天時に流入する大量の合流下水(汚水と雨水の混合水)が未処理のまま、ポンプ場及び下水処理場から河川へ放流される場合がある。この際、消毒を行うことで汚水中の大腸菌が殺菌され、放流水域の環境に与える影響が低減できる。消毒剤に塩素を使用する場合、河川へ流出した残留塩素が水生生物に悪影響を及ぼすおそれがある。このため、適切な塩素注入率で消毒を実施する必要があるが、雨天時の合流下水の水量と水質は変動が大きく適切な塩素注入率を決定することが困難であった。

当社は、塩素注入率を決定するための指標について要素実験に基づいてモデル化を行い、塩素注入制御システムを開発した。このシステムは、放流水中の残留塩素濃度と大腸菌群数をともに低減することを目標としている。ここではモデルの概要と、雨水ポンプ場での検証実験結果を示す。

3.1 塩素注入率演算モデルの概要

下水に対する塩素消毒では、塩素注入率と処理水の残留塩素濃度・大腸菌群数との関係が図5のようになることが知られている。塩素注入率が増加すると、大腸菌群数は指数関数的に減少する。一方残留塩素は、下水中の有機物と反応してある程度消費された後、下水中に多く含まれるアンモニアと反応した結合塩素の形でその濃度が比例的に増加する。

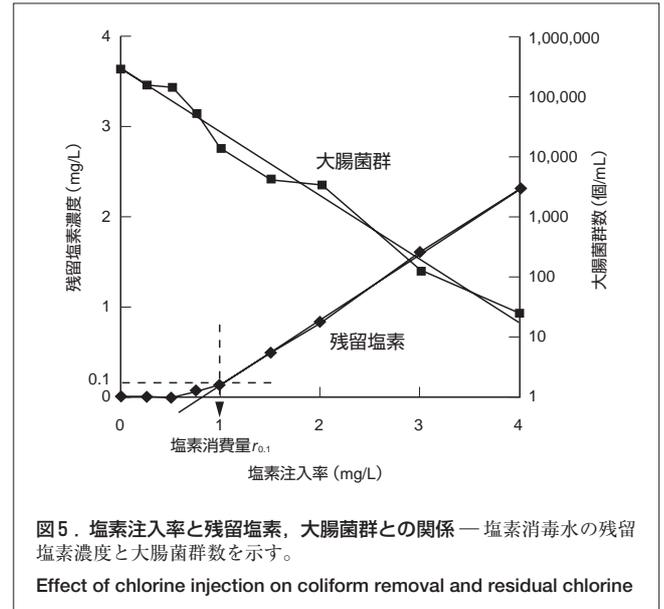
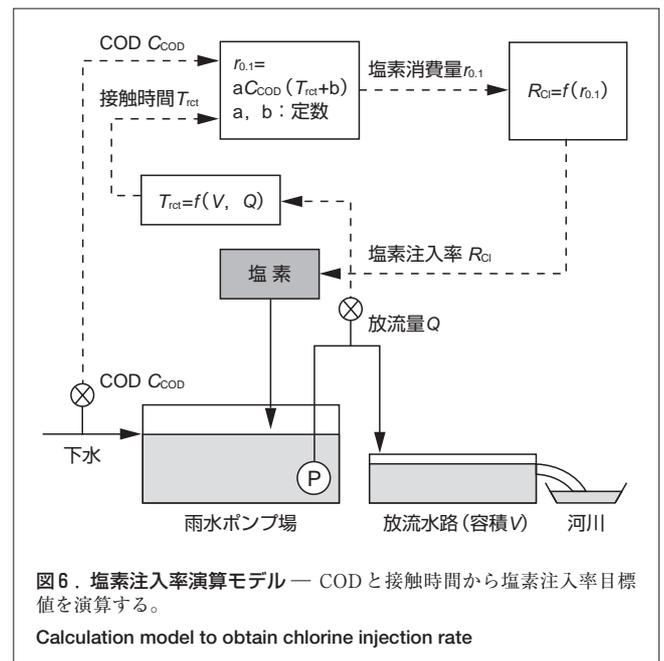


図5で、残留塩素がわずかに検出される点として、残留塩素濃度が0.1 mg/Lとなる塩素注入率を残留塩素増加直線より求め、これを塩素消費量 $r_{0.1}$ (mg/L)とする。 $r_{0.1}$ より少ない塩素注入率では、塩素は有機物との反応に多く消費されるため消毒への寄与が少ない。一方、 $r_{0.1}$ より多い塩素注入率では、処理水に残存する塩素量が増加する。したがって、大腸菌群数の低減と残留塩素濃度の低減を両立させる最適な塩素注入率は塩素消費量 $r_{0.1}$ を指標として決定できる。

実験から、塩素消費量 $r_{0.1}$ は①下水のCOD (Chemical Oxygen Demand ; 化学的酸素要求量)と②下水と塩素との接触時間によって求まることがわかり、これらを入力値とす



る塩素注入率演算モデル式を決定した(図6)。

下水のCODは下水中に含まれる有機物量を示し、CODが大きくなるほど塩素と反応する有機物量が増えるため、 $r_{0.1}$ はCODに比例して増加する。接触時間は、塩素による酸化反応の反応時間を意味し、反応時間が長くなることにより塩素と有機物との反応量が増えるため、 $r_{0.1}$ は接触時間に対して増加する。 $r_{0.1}$ と接触時間との関係式は、通常の接触時間の範囲では一次式で近似でき、次式が得られた。

$$r_{0.1} = aC_{\text{COD}} (T_{\text{ret}} + b)$$

a, b : 定数

C_{COD} : 下水のCOD

T_{ret} : 接触時間

最終的な塩素注入率 R_{Cl} は $r_{0.1}$ に対して、目標とする放流水の大腸菌群数と残留塩素濃度に基づいた補正を加味して演算する。

雨天時の雨水ポンプ場からの放流水に対して消毒処理を行う場合、入力値である C_{COD} は、雨水ポンプ場へ流入する合流下水のCODを計測することで得られる。もう一つの入力値である T_{ret} は、塩素注入から放流されるまでに合流下水が放流水路で滞留する時間であり、これは放流量 Q と放流水路容積 V から計算により得られる。

3.2 雨水ポンプ場での消毒実験結果

塩素注入率演算モデルの検証として、雨水ポンプ場で

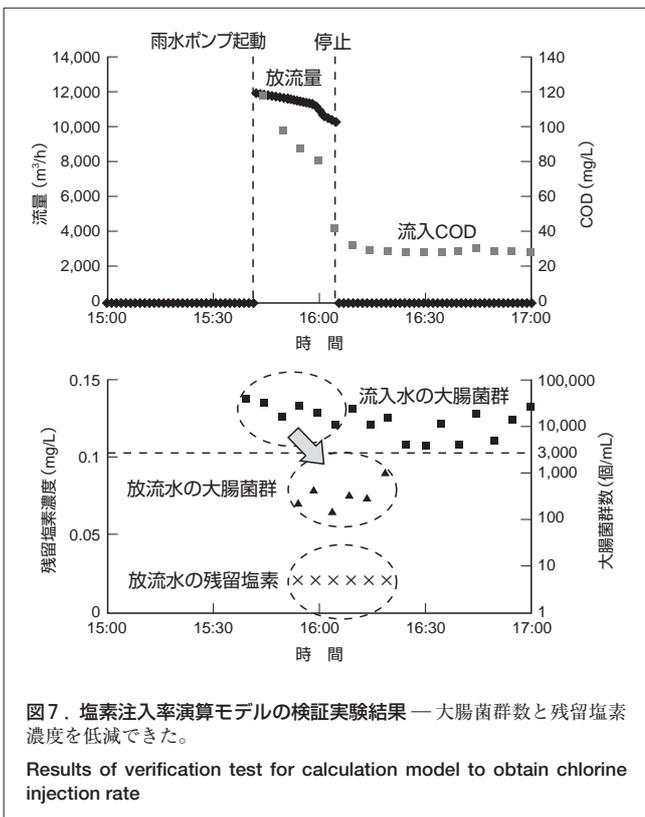


図7. 塩素注入率演算モデルの検証実験結果 — 大腸菌群数と残留塩素濃度を低減できた。

Results of verification test for calculation model to obtain chlorine injection rate

消毒実験を実施した。降雨日の雨水ポンプ場において、このモデルから決定された塩素注入率で消毒を実施し、その消毒効果を、放流水の大腸菌群数と残留塩素濃度で評価した。

評価結果を図7に示す。雨水ポンプによる放流は15:42から22分間行われた。雨水ポンプ起動後の流入水と放流水を採水し、COD、大腸菌群数、及び残留塩素濃度を分析した。消毒処理の効果は、流入水の大腸菌群数が約1万～4万個/mLであったのに対して、放流水の大腸菌群数は150～1,000個/mLの範囲にあり、すべて3,000個/mL以下となっていた。また残留塩素濃度も0.02mg/Lと低い値であった。

すなわち、 C_{COD} と T_{ret} の二つを入力値として、 $r_{0.1}$ を指標としたモデルで塩素注入率を決定することで、放流水の大腸菌群数と残留塩素濃度をともに低減できる結果が得られ、流入水の水量と水質変動に対応した適切な消毒処理を行うことができた。

4 あとがき

ここでは、当社が開発した雨水対策に関するシステム技術の中から、浸水リスク低減と合流改善対策を両立させる雨水ポンプ制御システムと、流入水の水量と水質の変動に対応して塩素注入率を制御し、放流水中に含まれる残留塩素を抑制する塩素注入制御システムについて紹介した。前者は、大雨時の浸水リスクを回避しながら小雨時の汚濁濃度の高い雨水の河川への放流量削減を行うことがポイントであり、後者は、CODと接触時間に基づいて塩素注入率を決定することで、放流水中の大腸菌群数と残留塩素濃度をともに低減することがポイントである。

今後は、開発した制御技術の有効性をフィールド試験で確認し、実運用に提供することにより、水環境の維持や雨水対策に貢献していきたい。

文献

- (1) (社)日本下水道協会. 合流式下水道改善対策指針と解説. 2002, 433p.
- (2) 君島和彦, ほか. 合流改善を考慮した雨水ポンプ制御システム. 環境システム計測制御学会誌 (EICA). 10, 2, 2005, p.22 - 29.



永森 泰彦 NAGAMORI Yasuhiko

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部主務。下水処理プロセス制御・支援技術の研究・開発に従事。計測自動制御学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



片山 恭介 KATAYAMA Kyosuke

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部。雨水排水関連の予測・制御・支援技術の研究・開発に従事。

Power and Industrial Systems Research and Development Center