

合流式下水道の越流水対策におけるシステム制御技術

System Control Technologies for Overflow Water of Combined Sewers

梅田 賢治 堤 正彦

UMEDA Kenji

TSUTSUMI Masahiko

近年、都市域において市街化の進展に伴う雨水浸透域の減少や、局地的豪雨が原因の都市型水害が多発している。これに加え、合流式下水道からの雨天時越流水の影響と思われる水環境の悪化が社会的な問題としてクローズアップされている。東芝は、合流式下水道の越流水対策において、運用面での対策で効果が期待できるリアルタイムコントロールなど、当社のシステム制御技術を活用した技術開発を進めている。

Recently, not only increased urban flood damage due to the decrease in rainfall infiltration areas, but also deterioration of public water quality from the outfalls of combined sewer systems have been attracting attention as social issues. The national government, local public bodies, educational facilities, and private enterprises have been studying combined sewer overflow (CSO) reduction and drawing up plans. In particular, expectations are being placed on system control technologies due to their advantage of low-cost operation.

Toshiba is developing technologies for CSO reduction such as real-time control (RTC).

1 まえがき

早い時期に下水道が普及した都市では、汚水とともに雨水と同じ管渠(かんきょ)で流す合流式下水道を多く採用し、この合流式下水道はこれまで公衆衛生の向上と浸水防除の両面から社会に対して大きな役割を果たしてきた。

しかしながら、近年、東京湾へのオイルボール漂着を機として、雨天時の合流式下水道越流水が、海域や河川などの公共用水の水環境へ与える影響がクローズアップされてきた。

合流式下水越流水の削減には、分流化、遮集管渠の増設、雨水貯留施設の設置、夾雑(きょうざつ)物除去施設の設置などの数多くの対策が存在する。しかし、用地の制約やコストの問題などから、建設着手するには相当の期間を要する。

そこで、早期に合流式下水道を改善することを目的として、既存設備を有効に活用して、越流水削減機能を付与することにより得られる効果が期待されている⁽¹⁾。

ここでは、システム制御技術を活用して、越流水削減に寄与する技術開発について述べる。

2 合流式下水道の越流水削減対策

国土交通省が主体となり、合流式下水道の改善を緊急的、総合的に進めるために、合流式下水道改善対策検討委員会が開催された。この委員会では、合流式下水道の実態調査を起点として、改善施策の目標や考え方、対策案を策定している⁽¹⁾。この中で、プロセスがほぼ明確になっていて、その

プロセスの効率的な運用や制御技術が必要とされている項目として、主に以下の二つが挙げられる。

(1) 雨水ポンプ場や雨水貯留施設の運用・制御 雨水ポンプ場の運用・制御技術は、降雨量、管渠内水位情報、流入予測値を有効に活用し、ゲートやポンプなどを適切に制御して、浸水リスクを抑えつつ越流水削減対策への寄与が期待されている技術である。

また、雨水貯留施設の運用・制御は、大容量の雨水を一時的に貯留できる雨水流出抑制機能のみならず、汚濁物質をも一時的に貯留できる汚濁物質流出抑制機能も備えている。降雨量、流入量、流入水質などの予測とそれを用いた運用技術によりこれらの機能を向上させ、越流水削減対策への寄与が期待されている技術である。

(2) 塩素消毒制御 塩素消毒制御は、塩素を注入するタイミングや塩素注入率を最適に制御することにより、放流水中の大腸菌群数及び残留塩素濃度を極力低く維持して、放流先の水環境を良好に維持する技術である。

3 システム制御による越流水削減対策

3.1 雨水ポンプ場や雨水貯留施設の運用・制御技術

3.1.1 現状の課題とリアルタイムコントロール 今まで、ポンプ場への予測流入量を把握することが困難であったため、豪雨発生時に雨水排水施設の最大排水能力を上回る流入量があれば、ポンプをいち早く運転することが重要であった。しかし、予測流入量が下水道施設全体で吸収可能な

容量であればポンプ排水を行う必要はなく、下水道施設の貯留容量を最大限に活用したポンプやゲートの運転により、汚濁負荷の削減が可能となる。これが、リアルタイムコントロール技術を活用した越流水削減対策手法である。リアルタイムコントロール技術による越流水削減対策の概念を図1に示す。

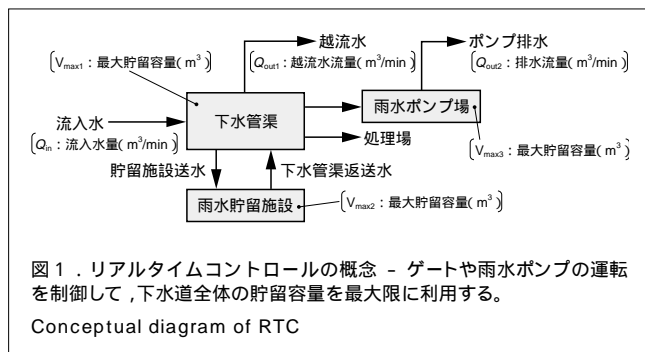


図1で $Q_{out1} + Q_{out2}$ を最小にするようにゲートや雨水ポンプの運転を制御して、下水道全体の貯留容量 ($V_{max1} + V_{max2} + V_{max3}$) を最大限に利用する。

リアルタイムコントロールの適用にあたり、流入水量やゲート、雨水ポンプの運転状態をもとに、下水道施設全体に最適な量の下水を貯留させること、つまり最適化問題を解くことが求められる。この最適化問題を解くには、今後、下水道施設に流入するピーク流量を正確にとらえ、その情報をもとに最適な制御則を導出することが必要である。

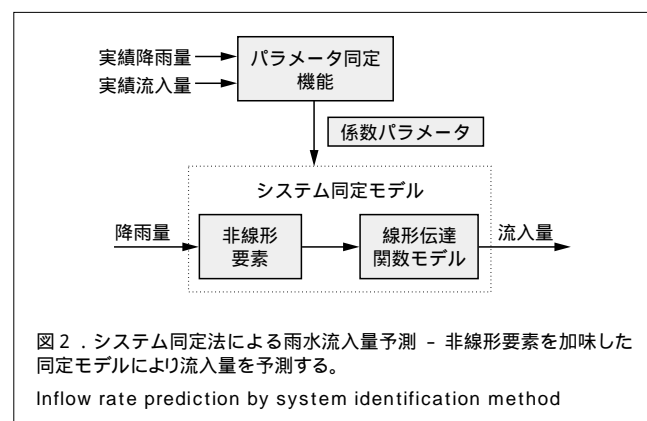
したがって、リアルタイムコントロールにおいて、予測技術は重要な要素技術となる。なお、図1では、流入水の濃度が一定であるという仮定に基づいている。これに対して、流入水質についてもダイナミックに変化することを考慮して最適化問題を解く場合は、降雨のパターンによっては更なる越流水汚濁負荷削減につながるものと考えている。

3.1.2 雨水ポンプ場や貯留施設の運用・制御技術に必要な予測技術
予測技術はこれまでの技術的改良により、精度の向上が図られており、制御情報としての活用が期待されている。雨水ポンプ場や雨水貯留施設の運用・制御で必要となる予測技術を表1に示す。

予測技術	概要	適用
降雨予測	レーダ雨量計による移動予測	浸水対策, 合流改善, 分流改善
流入量予測	ポンプ場などへの雨水流入量予測	浸水対策, 合流改善, 分流改善
流入水質予測	幹線における流入水質予測	合流改善, 分流改善
貯留水質予測	貯留施設の水質変化予測	返送・河川排水計画

この中で、流入量予測はリアルタイムコントロールでもっとも重要な要素技術であり、発生した降雨及び降雨予測に基づき、各施設に対する流入量を予測するものである。流入量予測では、リアルタイム性の確保と雨水流出過程の非線形性を考慮する必要がある。東芝では、解析対象となる流域やシステムの条件により、当社保有技術である拡張RRL (Road Research Laboratory: 物理モデル) 法⁽²⁾とシステム同定法 (非線形統計モデル)⁽³⁾のいずれかを適用している。ここではリアルタイム性の高いシステム同定法について述べる。

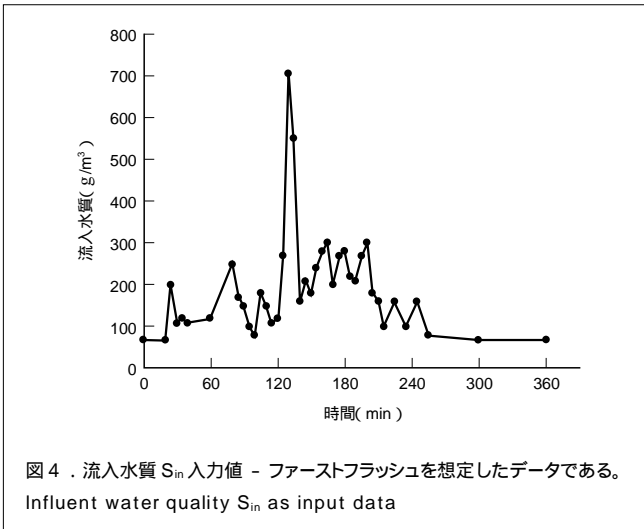
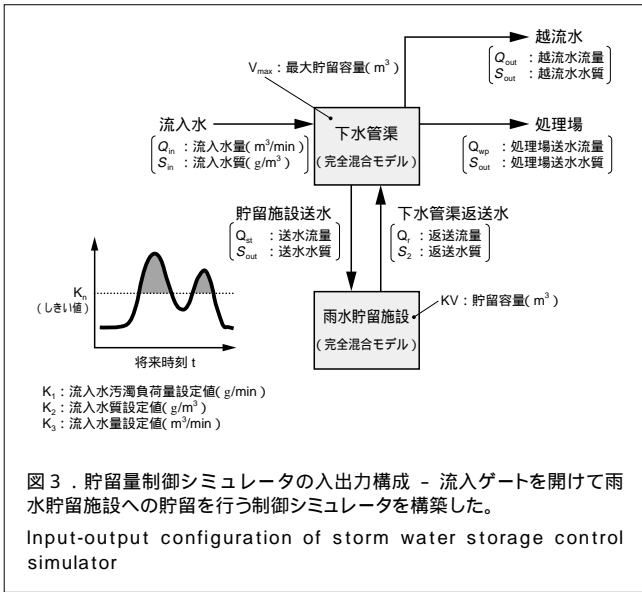
図2はシステム同定モデルを用いた流入量予測の概要である。システム同定モデルでは、降雨が管渠へ流出した後各施設へ流入するまで (又は、管渠へ流出するまで) の過程をブラックボックスとしてとらえる。そして、過去の降雨量データと流入量データを用いてモデルを構築し、構築したモデルに降雨を入力することによって流入予測を行うものである。システム同定モデルでは線形モデルが知られているが、拡張RRL法を用いた流入量予測システムの開発経験を生かし、有効降雨の非線形性に着目して非線形要素を加味した同定モデルを開発することにより、精度の向上を図ることができている。



3.1.3 リアルタイムコントロールの越流水削減効果⁽⁴⁾
前項の予測技術が組み込まれたリアルタイムコントロールを適用することにより、越流水汚濁負荷量の削減に寄与できることをシミュレーションで示す。なお、ここでは図1の中で、既設の貯留施設の利用に絞った場合の検証結果を示している。また、量だけでなく水質も加味した場合の越流水汚濁負荷量の削減効果をシミュレーションにて示す。

(1) シミュレーション方法
今回、汚濁物質濃度又は汚濁物質の負荷量が高いときに、流入ゲートを開けて雨水貯留施設への貯留を行う制御をシミュレーションにより検討した。

図3に示すように、① 流入水質 (汚濁物質濃度) S_{in} , ② 流入量 Q_{in} , ③ S_{in} と Q_{in} の積である流入水汚濁負荷



量を各々入力値として、各々のしきい値 K_nを超えたときに、雨水滞水池や雨水貯留管などの雨水貯留施設への送水量 Q_{st} (ゲート開度) を ON に制御する、貯留制御用シミュレータを作成した。

(2) シミュレーション条件 シミュレーションの定数設定値を表2に示す。下水管渠は雨水滞水池の貯留容積 10,000 m³ の 1/2 の容積があると仮定して、下水管渠最大貯留容量 V_{max} を 5,000 m³ とした。

表2. シミュレーション定数
Simulation constants

定数の記号	定数の名称	単位	数値
V _{max}	下水管渠最大貯留容量	m ³	5,000
Q _{st}	送水流量(下水管渠 貯留施設)	m ³ /min	100
Q _r	返送流量(貯留施設 下水管渠)	m ³ /min	130
Q _{wp}	処理場送水流量(下水管渠 処理場)	m ³ /min	100

流入水質の入力値は、図4のとおりである。流入量の入力値は、図5(a)を降雨aパターンとして、降雨aパターンの時間200 minから流入量が再度増大するものを降雨bパターンとした(図5(b))。降雨bパターンは、初期降雨汚濁流出(ファーストフラッシュ)でたい積汚濁物がほぼ流出し、200 min以降は、低濃度の雨水だけが流出しているという事象を想定している。KV値(貯留容量設定値)は、V_{max}の1倍、2倍、4倍と変動させ、各々のK値は流入量及び流入水質の範囲内で変動させた。

(3) シミュレーション結果 降雨aパターンにおける越流水汚濁負荷削減量の最大値の結果を図6(a)に、降雨bパターンの同結果を図6(b)に各々示す。降雨a, bパターンの両結果とも、貯留施設へ送水制御(ゲート制

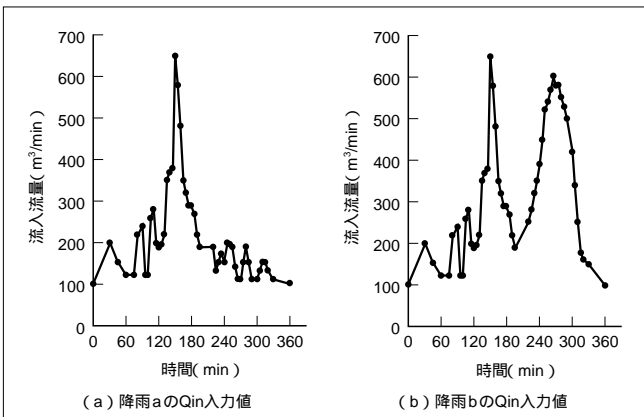


図5. 降雨a, bの流入流量 Q_{in} 入力値 - 降雨bでは、ファーストフラッシュでたい積汚濁物がほぼ流出後、低濃度の雨水のみが流出しているという事象を想定している。
Inflow rate Q_{in} of "a" and "b" rainfall patterns as input data

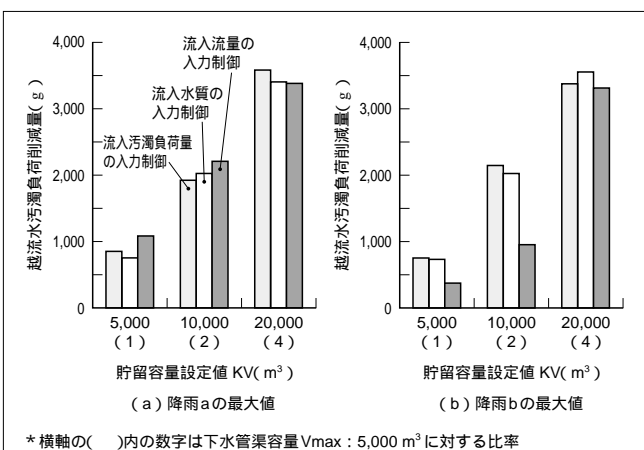


図6. 降雨a, bの越流水汚濁負荷削減量の最大値 - 降雨bでKVが5,000, 10,000 m³のときには、流入汚濁負荷量や流入水質を入力した制御が、流入量入力制御より合流式下水道越流水の流出量が改善された。
Maximum CSO mass values of "a" and "b" rainfall patterns as output data

御)することにより、越流水汚濁負荷量の削減に寄与できることが確認できる。

また、降雨aパターンでの各制御手法を比較すると、貯留容量設定値がいずれの場合も各制御で差異はほとんど見られない。

しかしながら、降雨bパターンでは、KV値が20,000 m³のときには各制御はほとんど同値であるが、KV値が5,000及び10,000 m³のときには、流入汚濁負荷量、流入水質を入力した制御のほうが、流入量入力制御より、合流式下水道越流水流出量が改善された。これは、比較的貯留容量が小さいケースでは流入汚濁負荷量又は流入水質を入力した制御のほうが流入量入力制御よりも越流水削減に寄与することを示している。

3.2 越流水塩素消毒における制御技術

3.2.1 現状の課題と塩素消毒制御技術の適用 国土交通省が主催した合流式下水道改善対策検討委員会で、公衆衛生上の配慮が必要な水域におけるポンプ場では、原則として消毒を行うことが示され、消毒を実施する場合の当面の目標として、大腸菌群数3,000個/mL以下が挙げられた⁽¹⁾。大腸菌の消毒方法の一つである塩素消毒は、安価で実績もある方法である。しかし塩素消毒は、残留塩素が水中の有機物と反応して生成したトリハロメタンなどの消毒副生成物が、放流先の魚類などへ悪影響を及ぼすことも懸念されている。そのため、適正な注入濃度、接触時間、注入地点などを把握したうえでの適用が必要である。

次項では、適切な塩素注入率目標値を演算するため、その重要因子を抽出するために実施したピーカ実験の結果について述べる。

3.2.2 塩素消毒実験結果 対象の下水500 mLをピーカに投入し、このピーカを水槽内に入れてスターラーで攪拌(かくはん)しながら、設定した塩素注入率に基づいて次亜塩素酸ナトリウム溶液をピペットにて指定量滴下する。水槽は、温度コントローラによって20℃に維持した。なお、塩素消毒ピーカ実験の下水水質条件は、①COD(化学的酸素要求量)、②NH₄-N(アンモニア性窒素)、③接触時間の3点とした。

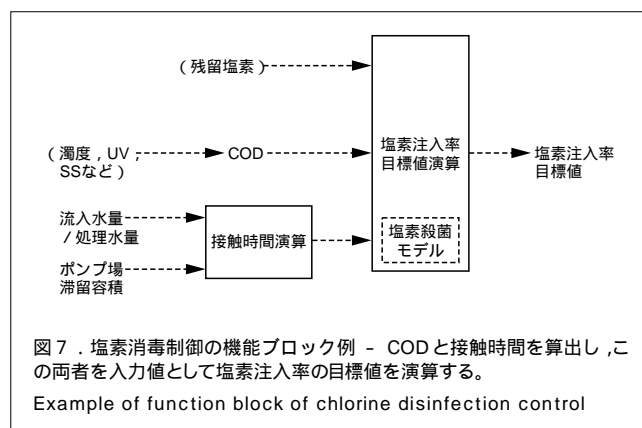
ピーカ実験により、大腸菌群及び残留塩素濃度の低減、すなわち塩素消毒の効果に影響を及ぼす下水水質条件は、

COD > 接触時間 > NH₄-N

という結果となった。

3.2.3 塩素消毒制御システムの検討 前述した塩素消毒ピーカ実験の結果から実際の塩素消毒制御として図7のような構成が考えられる。

すなわち、もっとも塩素消毒効果に影響を及ぼす因子であるCODを、連続計測可能な濁度、UV(紫外線)、SS(浮遊物質)などの水質センサにより演算し、かつ流入量から接触時



間を演算し、この両者の演算値を入力値として塩素注入率の目標値を演算するものである。今後、実機に適用するうえで、この塩素消毒モデルの構築が重要と考えられる。

4 あとがき

今回、合流式下水の越流水対策に対して当社が取り組んでいる主な技術として、雨水ポンプや雨水貯留施設の運用・制御と塩素消毒制御の技術開発について述べた。今後は、予測モデルの更なる精度向上や塩素消毒モデルの構築に注力し、システム技術の開発を継続していきたい。

当社では、今後とも情報、予測、制御などの要素技術を駆使して、合流式下水の越流水削減対策に貢献していく。

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年版。
- (2) 山田富美夫,ほか. 降雨流出解析法下水道雨水ポンプ制御支援システムの実用化. 電気学会論文誌D. 119-D, 2, 1999, p.168 - 174.
- (3) 山中 理,ほか. Hammerstein型非線形モデルを用いたシステム同定手法による下水道雨水流入量予測. 電気学会論文誌D. 120-D, 4, 2000, p.566 - 573.
- (4) 堤 正彦,ほか. 雨水貯留施設の運用支援・制御技術の開発. 環境システム計測制御学会(EICA). 5, 2, 2000, p.13 - 18.



梅田 賢治 UMEDA Kenji

電力・社会システム社 社会システム事業部 公共システム技術第二部主務。公共システムのエンジニアリング業務に従事。
Public & Industrial Systems Div.



堤 正彦 TSUTSUMI Masahiko

電力・社会システム社 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。日本水環境学会、環境システム計測制御学会会員
Power and Industrial Systems Research and Development Center