

内水氾濫軽減のために雨水を汚水関連施設へ流入させるハイブリッドな下水道システムの提案と効果に関する研究

白柳 博章¹・北村 幸定²

¹正会員 奈良県県土マネジメント部地域交通課（〒630-8501 奈良県奈良市登大路30）

E-mail: crr_437f@maia.eonet.ne.jp

²正会員 摂南大学理工学部都市環境工学科（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8）

E-mail: kitamayu@mbox.kyoto-inet.or.jp

近年、わが国においては、少子高齢化・人口減少や経済活動の減退により、家庭排水ならびに工場排水の減少が進んできた結果、下水道事業における汚水関連施設の処理能力に余剰が生じつつある。その一方で、集中豪雨による内水氾濫の頻発といった自然災害に関するリスクが増大しつつあるが、下水道事業における雨水排水対策は一向に進んでおらず、処理能力が不足している。

そこで本研究では、下水道システムにおける地下空間の有効活用を目指すべく、雨水を汚水関連施設へ流入させる方策についての提案を行うとともに、ハイブリッドな下水道システムの構築と運用の概要について述べる。そして、本提案における防災面・環境面の効果について概説するとともに、内水氾濫軽減効果についての定量的評価を行った。その結果、河川改修や雨水貯留事業といった従来のスキームによる施策と比較し、非常に有効かつ即効性の高い施策であることを明らかにした。

Key Words : *Hybrid sewerage systems, Rainwater, Environment, Disaster prevention, Management*

1. 研究の背景と目的

近年、水道・下水道・電気・ガス・道路といった社会的基盤施設ストックの膨大な蓄積とともにその老朽化の進行が危惧されており、それは、日常の快適な市民生活の維持を脅かしつつある。また、東南海・南海地震や活断層地震による地震災害や、局地的豪雨による内水氾濫被害等の自然災害に関するリスクも増大し、蓄積している。他方、社会的情勢をみると、少子高齢化や人口減少により、利用料金や税収の低迷といった財政状況の逼迫が予想され、今後、上下水道合わせて120兆円（下水道80兆円、上水道40兆円）を越えるとされる日本全体の資産の適正な維持管理・改築更新の確実な実施に向けた事業推進等がこれからの大きな課題となっている。快適な市民生活の維持するためには、サービスレベル維持を鑑みつつ、事業者として施設の更新や維持管理の費用を最小化していく議論を進めることが、市民へのサービス向上と説明責任を果たす上でも重要となってきている¹⁾。

しかしながら、下水道の事業者については、概ね市町

村を単位としており、比較的小規模な所が多い。そのようなところでは、長期的な視点から下水道施設の更新や維持管理をどのように進めていくか、また限られた財源の中でどのようなサービスレベルを提供できるか、について定量的な検証を前提とした議論が進めにくく、短期的な視点にとどまりがちである。それゆえに、短期的・長期的な視点から施設の更新や維持管理に関するスキームを確立することは、事業者として施設のアセットマネジメントを実践する上で重要であると考え²⁾³⁾。

次に、下水道事業をとりまく社会的情勢をみると、少子高齢化や人口減少・海外移転等による経済活動の減退により、水道供給の需要ならびに工場排水の処理量の減少が続く中で、処理技術の向上も相まって、下水道事業における汚水関連施設の規模や処理能力に大きな余剰が生じつつあるのが現状である。その一方で、集中豪雨の頻発により局地的な内水氾濫被害等自然災害に関するリスクが増大しつつあるが、下水道事業における雨水排水対策は進んでおらず、処理能力が慢性的に不足している。これらの下水道事業の相反する事象は、言い換えれば都市における下水道システムにて使用されている地上・地

下空間が有効に活用されていないことを現すものである。そこで本研究では、都市における地下空間の有効活用を目指すべく、下水道システムのハイブリッドな運用、すなわち、汚水関連施設へ雨水を流入させる方策についての提案を行う。そして、本提案が環境面や防災面に対してどのような効果や影響をもたらすかを検討するとともに、下水道システム全体をマネジメントする上でそれらの施策を実行するための技術的・制度的課題について整理する。

具体的には、第2章にて、対象都市における下水道事業の現状と課題を述べたうえで、汚水事業と雨水事業がそれぞれ抱える問題点について整理する。

第3章にて、下水道事業の抱える問題点を踏まえ、本研究で提案する下水道システムのハイブリッドな運用について概説する。

第4章にて、対象都市における雨水幹線・汚水幹線ならびに内水氾濫箇所について概要を示した後、内水氾濫被害の発生要因ならびに内水氾濫被害軽減対策の経緯と今後の見通しについて述べる。

第5章にて、本研究で提案した下水道システムのハイブリッドな運用を対象地域にて実行した場合に、雨水排水処理能力の向上ならびに内水氾濫発生確率の低下に関する定量的な評価を行う。

最後に、第6章にて、本研究のまとめを行うとともに、下水道システム全体をマネジメントする上でそれらの施策を実行するための様々な課題について整理する。

2. 下水道事業の現状と課題

(1) 汚水事業の現状と課題

本研究で対象となるのは、京都府長岡京市（以下、本市）であり、可住地面積に対する人口密度が約7,000人/km²と高く、平坦な河川堤内地に位置している大阪や京都へのベットタウンである。また、名神高速道路に近接することから多数の工場も立地している。

汚水事業において下水道普及率は99.3%（2013年4月1日現在）となっており、ほぼ完成に近い状態に至っている。また、人口は近年横ばい状況にあるが、生活環境の変化や工場排水の減少により、日平均・日最大の下水道処理量はともに年々減少している。

(2) 雨水事業の現状と課題

雨水事業において設定されている当地での計画降雨量は5年確率で53.1mm/hr、10年確率で61.6mm/hrである。しかしながら、本市に設置されている気象庁アメダスにおいて、2008年7月には時間最大降雨量76.5mm/hr、2010年8月には時間最大降雨量96.0mm/hrを記録するなど、近年10年確率を超える時間降雨量が見られ、局地的ではあるもの

の、たびたび内水氾濫の被害が発生する状況となっている。

台風や集中豪雨の頻発により、内水氾濫被害等自然災害に関するリスクが増大しつつあるが、地形的な要因から雨水が流出しにくい状況である。さらに、人口密集地で狭隘な道路が多いことから、雨水排水・貯留施設の新設といった雨水事業は順調に進まない。

(3) 下水道事業の問題点

上記で述べたように、汚水事業については処理能力に余力を残している状態にある。すなわち、下水道（汚水）施設にて使用している地上・地下空間について余剰が生じている。反対に、雨水事業については、局地的な内水氾濫被害等自然災害に関するリスクが増大している現状においても、満足に対応できていない状態にある。下水道（汚水）施設にて使用している地上・地下空間は不足しているが、内水氾濫被害といった人命にかかわる事象について、安全・安心なるまちづくりを行っていくために、下水道事業が果たす役割として、この空間利用のギャップをできるだけ埋めていく努力が今後求められていると筆者は考える。ここで、本稿で提案する下水道事業における空間利用の現状に関するイメージを図-1に示す。



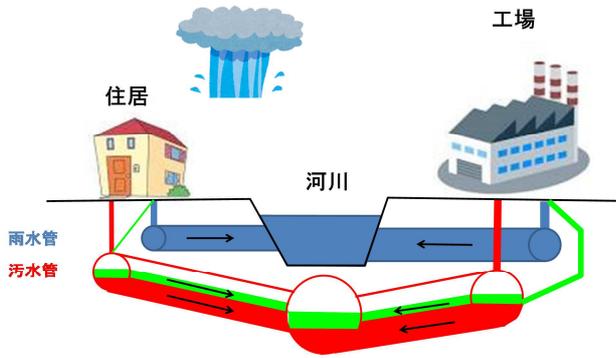
図-1 下水道事業における空間利用の現状

3. ハイブリッドな下水道システムの運用の提案

(1) 概要

本研究で提案する下水道システムのハイブリッドな運用のイメージを図-2に示す。集中豪雨のような、雨水管のみで処理できるような降雨量でないような状況となり、雨水の排水処理能力が限界になる状況が想定されるときに、汚水管の処理能力余剰を利用し、雨水を汚水管に流入させることにより、雨水の排水処理能力不足を緩和させ、内水氾濫被害などを抑制させるものである。

この運用は、汚水と雨水を一緒にして河川に流す合流式ではなく、汚水と排水処理能力を超えた雨水の一部を汚水処理場へ流入させる分流式を基本とした利用拡大である。



雨水の排水処理能力が限界である状況が想定されるとき
雨水を污水管に流入

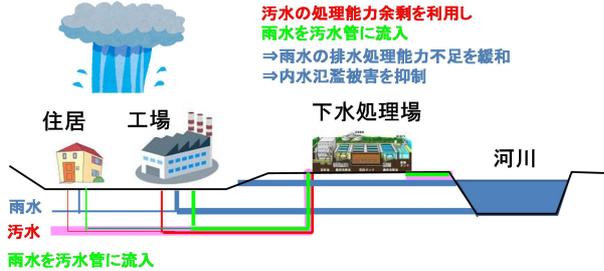


図-2 下水道システムのハイブリッドな運用のイメージ

(2) 効果と影響

この運用により、雨水の排水処理能力不足を緩和させ内水氾濫被害を抑制する、という防災上での効果が期待される。図-3に示すように、従来であればある地域に対する雨水処理系統が1つだけであったものが、污水管を利用した雨水処理系統ができることにより、雨水の排水処理能力を空間的・時間的に増加させることが可能であると考えられる。さらに、地域ごとの降雨量予測などの気象データと合わせた雨水の排水処理システムを構築することにより、局地的なゲリラ豪雨により発生する内水氾濫被害を軽減・防止することが可能となると考える。

また、図-4に示すように、初期の降雨時には路面上の塵やほこりを含んだ濁水、いわゆるフラッシュ雨水管に流れ込んでいる。それを污水管で処理することにより、河川の濁水防止にもつながるものと考えられる。さらに、流量の少ない污水管における洗浄効果・臭気の防止効果といった環境面での効果も期待できる。

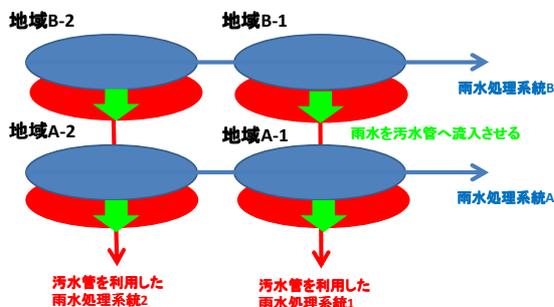


図-3 ハイブリッドな雨水処理系統

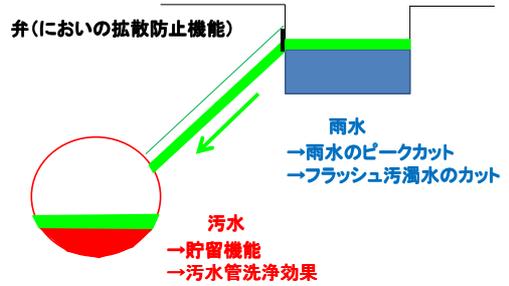


図-4 ハイブリッドな運用による環境面の効果

しかしながら、雨水の排水処理能力の限界時点を的確に予測できるか、といった不確実性や、適用方法によっては下水道の処理施設に多大な負担を強いる、といった問題が生じる可能性がある。また、雨水管と污水管を接続することによる臭気の拡散や逆流、事業者や地域住民に対する合意形成、システム構築による費用対効果、といった問題を考えていく必要がある。

4. 本市での内水氾濫被害軽減対策の経緯

(1) 雨水幹線・污水幹線・内水氾濫箇所の概要

図-5に、本市における雨水幹線・污水幹線ならびに内水氾濫箇所の位置関係を示す。雨水幹線・雨水貯留幹線はポンプ場や吐口を通して府管理の河川（小畑川・犬川）に、污水幹線は府の流域下水道に接続した上で最終的には洛西浄化センターにて下水処理されている。

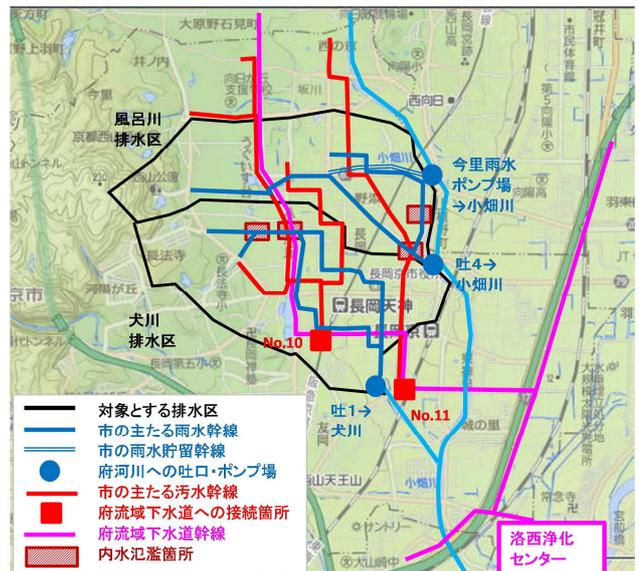


図-5 雨水幹線・污水幹線ならびに内水氾濫箇所

(2) 内水氾濫被害の発生要因

過去における主な内水氾濫箇所は、図-5に示すように風呂川排水区の下流側の2か所、犬川排水区の上流側の2か所である。

風呂川排水区については、元々5年確率（計画降雨量は53.1mm/hr）で計画された流域であり、頻繁に内水氾濫していた。その後、H17年度に市の雨水貯留幹線と今

里ポンプ場が完成し10年確率（計画降雨量は61.6mm/hr）で整備された流域となった。

犬川排水区については、元々10年確率で計画されている河川であるが、吐1の下流側にある犬川とJR東海道本線との交差する箇所にて河川狭隘な箇所があり、大雨が降った場合にはそこで処理しきれない雨水が上流側に貯留されバックがかかる構造である。その結果、地図に示した箇所でオーバーフローし内水氾濫が発生している。

(3) 内水氾濫被害軽減対策の経緯と今後の見通し

内水氾濫被害を軽減するための方策としてはまず河川改修があげられるが、風呂川排水区・犬川排水区とも住宅地が密集しており、その用地買収や工事は容易ではなく、遅々として進まなかった。

それゆえに、下水道事業における雨水事業が実施され、犬川排水区では10年確率での降雨強度を満足するに至ったが、風呂川排水区では地下空間の制約から5年確率での降雨強度を満足するまでにしか至らなかった。そのため、風呂川排水区では下水道事業における雨水貯留事業が実施された。しかしながら、貯留槽の高さが小畑川より低い位置にあるためポンプアップして排水せざるを得なくなり、そのため今里雨水ポンプ場が38億円かけて建設された。

あとは犬川排水区において、犬川とJR東海道線との交差する箇所の河川断面の拡幅が求められてきている。しかしながら、JR東海道本線は当区間では複々線かつ大阪と東京を結ぶ大動脈であることから、その改修には数百億かかるものと推測される。そのため、従来のスキームによる内水氾濫被害軽減対策は費用対効果や財政状況から鑑みて実施できない状態にある。

5. ハイブリッドな下水道システムの運用による雨水排水処理能力の向上

(1) 下水道システムのハイブリッドな運用方法

運用方法についてのイメージを図-6に示す。雨水幹線と汚水幹線をトラップを設けた上で管路で接続する。これにより、運用していないときには汚水幹線からの臭気防止を図ることが可能になる。また、運用時には、汚水幹線からの逆流が起こらない程度の流量で、雨水幹線から雨水を汚水管を流入可能とさせるものとする。農業用水の関係で特に逆流を発生させないようにするためには堰を設けることも考えられる。

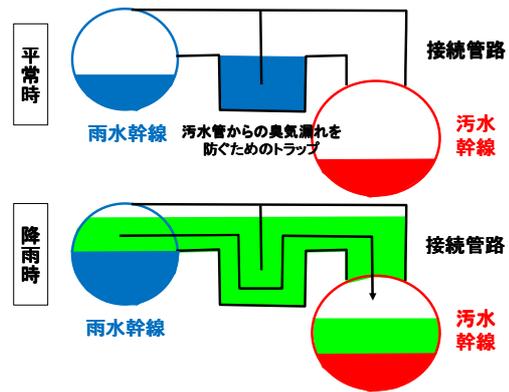


図-6 ハイブリッドな運用のイメージ

(2) 雨水幹線と汚水幹線の接続箇所の選定

雨水幹線と汚水幹線の接続箇所については何点か候補地を挙げ、実現可能性が高くかつ効果が望める箇所を各排水区2箇所ずつ、計4箇所選定した。その箇所図を図-7に示す。



図-7 雨水幹線と汚水幹線の接続点

風呂川排水区については、雨水幹線が合流してから小畑川への流入量を抑制するため、雨水幹線が合流する直上流でかつ内水氾濫被害があった箇所に接続点①（風呂川第1号雨水幹線→中央長岡第1号汚水幹線へ流入）を設けた。また、風呂川第1号雨水幹線への流入量自体を抑制するため、府流域下水道との交差点に接続点②（風呂川第1号雨水幹線→府流域下水道西幹線へ流入）を設けた。

犬川排水区については、犬川からのバックの影響を最小限に留めるため、下流側の府流域下水道No.10～No.11と雨水幹線が交差する付近に接続点③（犬川第1号雨水幹線→府流域下水道西幹線へ流入）を設けた。また、犬川第1号雨水幹線への流入量自体を抑制し、かつ内水氾濫被害があった箇所に接続点④（犬川第1号雨水幹線→府流域下水道西幹線へ流入）を設けた。

いずれの箇所についても雨水幹線と汚水幹線との交差する箇所に接続点を設けることにより、接続管路の延長

が短くなり建設費が抑制できる。また、接続点①については片側1車線の府道同士が交差する箇所、接続点②③④については幅2.2mの都市計画道路の箇所であり工事による影響が最小に抑えられる。さらに地下空間に余裕があれば雨水貯留施設を設けることも可能な箇所である。

(3) 余裕率の定義と算出

汚水幹線の最大流量に対する管路空間の余剰分の割合を、本研究では余裕率と定義し、式(1)より算出する。

$$\text{余裕率} = 1 - \text{汚水占有率} - \text{自然雨水占有率} \quad (1)$$

ただし

$$\text{汚水占有率} = \text{汚水の流量} / \text{汚水幹線の最大流量}$$

$$\text{自然雨水占有率} = \text{雨水占有原単位} \times \text{処理区域面積}$$

$$\times \text{降雨量} / \text{降り始めから汚水幹線末端での流出完了までの時間} / \text{汚水幹線の最大流量}$$

ここで、雨水占有原単位とは、処理区域での降雨により汚水幹線に自然流入する雨水の流量から処理区域面積と降雨量を除いたものであり、これは1haの流域に1mmの降雨があったときに汚水幹線に自然流入する雨水の流量を表すものである。

汚水占有率については、洛西浄化センターにおける時間最大汚水量を日換算した量300,500 m³/日に対する晴天時での日平均汚水量143,736 m³/日の割合から47.8%とした⁴⁾。

雨水占有原単位については、洛西浄化センターにおける処理区域面積4,127haでの1mmの降雨量に対する流入下水量の増加量は1,181 m³であることから0.2862m³/ha/mmとした。

ここで、10年確率の計画降雨量(61.6mm/hr)が1時間継続して風呂川排水区と犬川排水区(計288ha、以下2水系と記す)に降った場合、2水系への降雨により汚水幹線に自然流入する雨水の流量は計0.2862×61.6×288=5,078m³となる。ここでの降り始めから汚水幹線末端での流出完了までの時間を管路延長と管流速から鑑みて2時間と想定すると、汚水幹線末端での自然流入する雨水の流量は0.705m³/sとなり、汚水幹線末端での最大流量5.648 m³/sから自然雨水占有率は12.5%、汚水管路の余裕率は39.7%となる。

(4) 雨水排水処理能力の向上の評価

2水系に接続点①～④を設け、雨水を汚水幹線へ流入させるハイブリッドな下水道システムの運用による雨水排水処理能力の向上について定量的な評価を行う。

その際の前提条件は下記のとおりとした。

- 10年確率の計画降雨量(61.6mm/hr)が1時間継続して風呂川排水区と犬川排水区に降った想定で評価する
- 風呂川排水区の末端における10年確率の計画流量は14.755m³/s、犬川排水区では23.841m³/sとし、風呂川排

水区と犬川排水区での排水流量の増加率(以下向上率と記す)が同じになるように、接続点①～④での雨水の汚水幹線流入配分量を調整する。

○各接続点での雨水の汚水幹線流入配分量は、汚水幹線管容量×余裕率以下とする。

○接続点①～④での雨水の汚水幹線流入配分量の合計は、流出点での汚水幹線管容量×余裕率以下とする。

○接続点②③④での雨水の汚水幹線流入配分量の合計は、汚水幹線西幹線φ1350の管容量×余裕率以下とする。

○接続点②④での雨水の汚水幹線流入配分量の合計は、汚水幹線西幹線φ1100の管容量×余裕率以下とする。

さらに、計画降雨量以上の降雨があった場合に、自然雨水占有率が上昇し余裕率が低下することに留意して算出したところ、2水系においては65.0mm/hrの降雨が1時間継続しても排水可能であることが明らかとなった。そのときの余裕率は39.0%、流量の増加量は2.132m³、向上率は5.52%と算出された。その詳細を表-1に示す。

表-1 雨水排水処理能力の向上

	接続点①	接続点②	接続点③	接続点④	流出点
雨水幹線名称	風呂川1	風呂川1	犬川1	犬川1	2水系
汚水幹線名称	中央長岡1	西幹線	西幹線	西幹線	西幹線
汚水幹線内径(mm)	800	1100	1350	1100	1650
汚水幹線勾配	1/500	1/200	1/170	1/200	1/500
水系計画流量(m ³ /s)	14.755	14.755	23.841	23.841	38.596
汚水幹線管容量(m ³ /s)	0.506	2.312	4.962	2.312	5.648
汚水幹線余裕率	39.0%	39.0%	39.0%	39.0%	39.0%
汚水幹線流入可能量(m ³ /s)	0.197	0.901	1.935	0.901	2.202
汚水幹線流入配分量(m ³ /s)	0.197	0.618	1.033	0.283	2.132
向上率	1.34%	4.19%	4.33%	1.19%	5.52%
向上率(水系全体)		5.52%		5.52%	5.52%

(5) 内水氾濫発生確率の低下の評価

2水系における運用前後での内水氾濫発生確率を求めるときに、長岡京市のアメダスデータ(1976-2000)に独立行政法人土木研究所水災害研究グループ水文チームによるアメダス確率降雨解析プログラム⁹⁾を適用する。このプログラムではFair式が用いられており、降雨継続時間と雨量からそのときの年確率が算出可能である。

そして、1時間降雨量がある一定の値を超えた場合に内水氾濫が発生するものとして、そのときの年確率の逆数を内水氾濫発生確率とした。

その結果をまとめたものを表-2に示す。運用前では0.0916回/年の内水氾濫発生(1時間降雨量で61.6mm/hr以上)であったものが、運用後では0.0727回/年の内水氾濫発生(1時間降雨量で65.0mm/hr以上)となった。すなわち下水道システムのハイブリッドな運用を2水系にて実行した場合、内水氾濫発生確率が20.7%低下することが明らかとなった。

表-2 内水氾濫発生確率の低下

	運用前	運用後
降雨継続時間(hr)	1	1
計画降雨量(mm/hr)	61.6	65.0
年確率(年/回)	10.918	13.760
内水氾濫発生確率(回/年)	0.0916	0.0727
内水氾濫発生確率の減少		20.7%

6. まとめと今後の課題

本研究では、下水道事業をとりまく社会的情勢を鑑み、汚水事業については処理能力に余力を残している反面、雨水事業については、局地的な内水氾濫被害等自然災害に関するリスクが増大している現状において、満足に対応できていない。言い換えれば都市における下水道システムにて使用されている地上・地下空間が有効に活用されていないという問題点を指摘した。

その上で、都市における地下空間の有効活用を目指すべく、下水道システムのハイブリッドな運用、すなわち、汚水関連施設へ雨水を流入させる方策についての提案と環境面や防災面に対してどのような効果や影響をもたらすかについて概説した。

そして、本研究で提案した下水道システムのハイブリッドな運用を風呂川排水区と犬川排水区にて実行した場合に、雨水排水処理能力の向上ならびに内水氾濫発生確率の低下について定量的な評価を行なった。その結果、この2水系においては61.6mm/hrから65.0mm/hrへの降雨が1時間継続しても排水可能であること、また内水氾濫発生確率が20.7%低下すること、が明らかとなった。

また、この運用による汚水処理量の増加は16,000m³程度あり、それによる長岡京市の処理費用の増加は672,000円となる。しかしながらH24年度における長岡京市での府流域下水道流入量は11,276,816m³であることを鑑みるとその割合は0.14%と微々たるものである。さらにこれらの接続点を設置するためにかかる費用は数億円程度であり、河川改修や雨水貯留事業といった従来のスキームによる内水氾濫被害の抑制施策と比較すれば、非常に有効かつ即効性の高い施策であるといえる。

しかしながら、実務的な課題として、下水道事業は雨水事業・汚水事業とも都市計画決定の上でなされるものであり、関係法令、関係機関との調整、特に計画流量や区域決定の見直しが重要となる。その際には、雨水事業・汚水事業別々ではなく、下水道システム全体として、また都市システム全体といった広い観点から議論できる環境をつくるべきである。

また、技術的な課題として、汚水関連施設へ雨水を流入させるための維持管理しやすいシステムの構築、すなわち、汚水幹線への流入配分量の調整方法のマニュアル化や臭気の拡散防止等にかかわる基準の策定といった、処理場への影響を軽減しつつも環境に配慮した処理・貯留システムの構築が必要であると考えらる。

今後は、本研究で提案した運用方法について、上記で述べた課題を克服すべく、氾濫シミュレーションを行うことにより、内水氾濫時間の軽減といった効果や汚水処理の負荷の増大といった影響についてより詳細に把握した上で、費用対効果⁷⁾の計測や運用方法の例示、ならびに課題をより詳細にい抽出・整理していく。それにより、既存の雨水処理施設と汚水処理施設を最大限に活用した雨水排水処理システムIRSS (Intelligent Rainwater and Sewage Systems) の構築を行い、事業者・関係機関や地域住民の合意形成を図るとともにその運用を目指していきたい。

最後に、内水氾濫被害といった人命にかかわる損害を最小限に留めつつ、安定した生活環境を長期間にわたって維持管理し、安全・安心かつ快適なるまちづくりをトータルで進めていくために、下水道事業が果たすべき役割はますます大きくなる。本研究において提案した方策が具体化され、新たな時代における下水道システムのアセットマネジメント実施の一助になることを願っている。

参考文献

- 1) 宮坂典男・岩田雄三:社会資本における NPM 型マネジメントシステムの構築に関する研究, 季刊 政策・経営研究, 2008 vol4
- 2) 国土交通省国土総合研究所下水道研究部下水道研究室:下水道管渠におけるストックマネジメント導入に関する検討調査, 国土交通省国土総合研究所平成 22 年度年報
- 3) 貝戸清之・鎌田敏郎・大谷明・山中明彦:下水道コンクリート管渠のストックマネジメント, 下水道協会誌 Vol.47 No.577, pp.78-86,2010.11
- 4) 平成 24 年度 維持管理年報資料集(桂川右岸流域下水道洛西浄化センター), 京都府流域下水道事務所, 2014.02
- 5) 京都府桂川右岸流域関連 長岡京市公共下水道事業計画(変更)認可申請書, 京都府長岡京市, 2010.03
- 6) 独立行政法人土木研究所水災害研究グループ水文チーム,アメダス降雨確率解析プログラム
<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm#PageTop>
- 7) (社)日本下水道協会:下水道事業における費用効果分析マニュアル(案), 2006.11
- 8) 白柳博章・北村幸定:下水道施設の最適更新・維持計画の策定指針に関する基礎的研究, 一社会的基盤施設における公共経営マネジメントシステムの構築とその運用に向けて一, 第43回土木計画学研究発表会(春大会) CD-ROM, 2011.05
- 9) 白柳博章・北村幸定:環境と防災に配慮したフレキシブルな下水道システムに関する研究-汚水関連施設への雨水流入方策に対する提案・定量的評価と技術的・制度的課題一, 第50回日本地域学会, 2013.10
- 10) Hiroaki Shirayanagi, Yukisada Kitamura: Quantitative study on the effectiveness of a flexible sewer system in disaster prevention and environmental issues, 2013 Sustainable City, 2013.12

(受付)