

特集：強靱な国土の実現を目指した土木技術

# 震災時の下水処理場機能不全に対する 感染リスク管理手法の考察

諏訪 守・津森ジュン・鈴木 穰

## 1. はじめに

上下水道一体となったこれまでの社会インフラの整備により、水系感染症防止に一定の効果が担保されていたが、東日本大震災の発生に際しては、下水道が津波により被災して機能不全に陥り、既存の水質管理システムの脆弱性が明らかとなった。下水道が機能不全となった場合には、施設復旧に長期間を要するため、それによる処理水質の悪化は水系感染症拡大防止に重大な影響を及ぼす。

今回の震災では、被災下水処理場は沿岸部に集中したが、仮に、水道水源の上流に位置する内陸部の処理場が被災した場合には、その下流域における浄水・利水施設に対し病原微生物の感染リスクが格段に高まることになる。このため、震災後の応急的な対応においても可能な限り水系感染リスクを低下させる手法を明らかにすることが求められている。

本報では、被災下水処理場における実態調査や過去の水系感染症の事例調査から明らかとなった課題を整理するとともに、下水道の応急的な対応策による感染リスク低減手法構築の必要性について考察した。

## 2. 震災などから得られた教訓

### 2.1 被災下水処理場における消毒効果

東日本大震災により下水処理場は壊滅的な被災を経験したが、被災処理場が沿岸部に集中したことで、簡易沈殿処理（写真-1）した多くの下水は海域放流された。



写真-1 簡易沈殿池  
(素堀した池での応急対応例)

簡易沈殿処理では沈殿池で汚濁粒子を沈降させた下水を塩素消毒するが、沈殿後の処理水の有機物濃度などが高いため、消毒剤の添加濃度を高めたり、病原微生物に対する消毒効果に及ぼす影響を考慮する必要がある。これらのことから、処理区域内の復旧状況を勘案しながら段階的に処理レベルを向上させ処理水質を安定化させなければならない。

段階的な応急復旧対策として、まずは簡易沈殿処理、そして簡易曝気処理、さらに簡易曝気処理+汚泥返送の仮復旧が実施され、最後に本来の活性汚泥処理へと移行させた対応が取られた（図-1）。ここでは、それらの消毒効果に与える影響を評価した。以下図-2～4を用いて衛生学的な指標として、塩素混和池などにおける添加塩素濃度に対する大腸菌群数の不活化率と残留塩素濃度割合の関係を説明する。

図-2に示すように、長期間（1ヶ月程度）の簡易沈殿処理系列では、15mgCl/Lの添加塩素濃度と無添加で大腸菌群数に違いがないため不活化効果が確認されず、残留塩素が検出されない（図-3）課題が

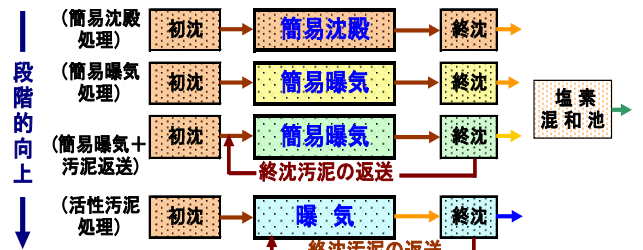


図-1 段階的な応急復旧対策

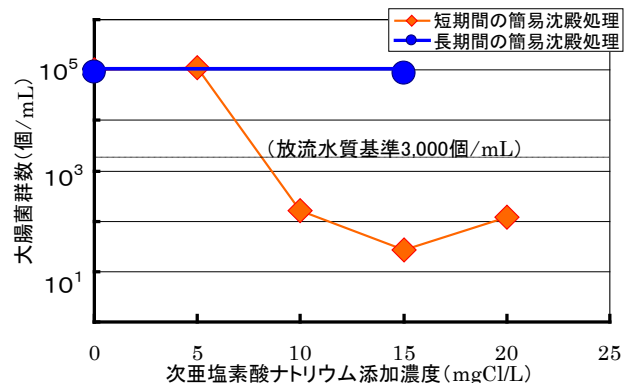


図-2 簡易沈殿処理後における次亜塩素酸ナトリウムの添加濃度と大腸菌群数の関係

Investigation of infection risk management techniques for deficient wastewater treatment plants destroyed by a devastating earthquake.

生じた。一方、短期間（1週間程度）の簡易沈殿処理系列では、次亜塩素酸ナトリウムの添加濃度を10mgCl/L以上とすることで、大腸菌群数は放流水質基準値以下となり、消毒効果に違いが生じていた。この要因を把握するため、最終沈殿池（終沈）での水質状況を調査した（表-1）。震災後から継続した長期間の簡易沈殿処理系列では、短期間の簡易沈殿処理系列と比べ下層濁度に大きな違いがあり、ORP（酸化還元電位）の電位が低いことから還元状態が強かった。このため、沈殿池下層に堆積した沈殿汚泥により生成された還元性物質が消毒剤を消費し、消毒効果に影響したものと考えられた。以上のことから、簡易沈殿処理では汚泥の堆積やORPの状況に応じた沈殿汚泥の引き抜き管理が重要であることが明らかとなった。

表-1 簡易沈殿期間に着目した最終沈殿池の水質状況

試料	項目	DO (mg/L)	ORP (mV)	濁度 (NTU)
短期間の通水系列 (表層)		1.0	-129	60
短期間の通水系列 (下層)		0.1	-134	65
長期間の通水系列 (表層)		1.2	-203	66
長期間の通水系列 (下層)		0.4	-183	990以上

図-3に処理機能ごとの添加塩素濃度に対する残留塩素濃度の割合を示す。最終沈殿池の沈殿汚泥の腐敗防止を目的とした簡易曝気+汚泥返送系の仮復旧により、残留塩素濃度の割合は上昇した。さらに、活性汚泥生成による処理機能の回復にともない、添加塩素濃度を低減させても残留塩素濃度の割合が上昇した。一方、大腸菌群の不活化効果は塩素濃度と接触時間に依存するため、図-4に残留塩素濃度と大腸菌群数の関係を示した。処理機能の回復により塩素の残留性が高まり、残留塩素濃度が上昇することにより、大腸菌群の不活化率が向上した。

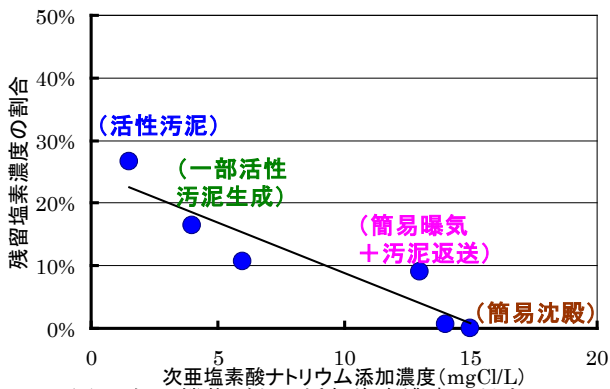


図-3 処理機能ごとの添加塩素濃度に対する残留塩素濃度の割合

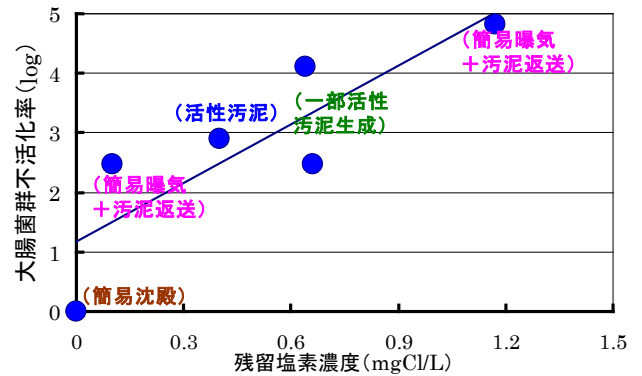


図-4 残留塩素濃度と大腸菌群の不活化率の関係

また、処理レベルの違いによる大腸菌群数の衛生学的な指標に加えノロウイルスについても評価を行った。ノロウイルスは冬季に流行する感染性胃腸炎の原因ウイルスの1つであり、流行が本格化し感染者が急増すると流入下水中のノロウイルス濃度が上昇する。下水や環境水に存在することから、腸管系ウイルス汚染指標の1つとして利用されている。

実際の簡易曝気+汚泥返送系と活性汚泥生成系の各処理水を採水した検水に次亜塩素酸ナトリウムを添加し、その添加濃度に応じたノロウイルス濃度の減少を評価した（図-5）。その評価時における各系の処理水質を表-2示す。簡易曝気+汚泥返送系に比較して活性汚泥生成系では、次亜塩素酸ナトリウムの添加濃度の増加に対するノロウイルス濃度の減少効果が大きい。処理水の有機物（T-CODcr）濃度やSSに大きな違いがあることから、活性汚泥生成にともなう水質の改善効果は、ノロウイルスの塩素消毒効果を向上させるものと考えられた。

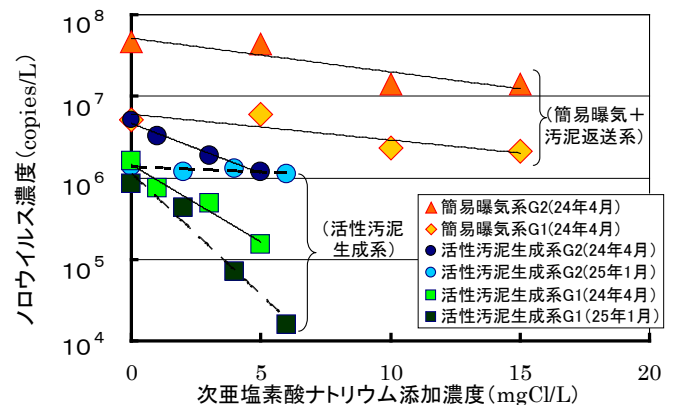


図-5 次亜塩素酸ナトリウム添加濃度とノロウイルス濃度の関係

表-2 各系列の処理水質

系列	項目	処理水質 (mg/L)	
		T-CODcr	SS
活性汚泥生成系		61	8
簡易曝気+汚泥返送系		301	66

(H24年4月)

一方、活性汚泥生成による生物処理への移行当初は、活性汚泥生物相が生成途上であり処理水質が安定しないことは容易に推測できたため、その生物相の状況がノロウイルス除去率に影響を与える可能性がある。その関係の評価結果を表-3に示す。処理系列が異なる3系列で評価を行ったが、有機物等の除去性能が良好な時に曝気槽に出現する活性汚泥性生物量の割合が比較的大きい3系において、ノロウイルスの除去率は高いが、それよりも割合が小さい1、4系では低く、活性汚泥の生成途上においてはウイルス除去率が低いことに留意する必要があることが明らかとなった。

表-3 活性汚泥生物相とノロウイルス除去率の関係

測定項目	系列名	1系	3系	4系
活性汚泥性生物の割合 (%)		12.8	43.9	36.5
中間活性汚泥性生物の割合 (%)		87.2	54.0	62.7
非活性汚泥性生物の割合 (%)		0	2.1	0.8
ノロウイルスG1除去率 (log)		1.9	2.1	1.9
ノロウイルスG2除去率 (log)		1.9	2.3	1.8

上記の段階的な復旧対策技術の評価結果を表-4に示す。震災対応初期における簡易沈殿処理では、沈殿池の沈殿汚泥の引き抜き管理が消毒効果に及ぼす重要な因子であり、簡易曝気や汚泥の返送による処理機能の向上により消毒効果は向上した。さらに、最終段階としての活性汚泥処理では有機物濃度が減少し、より消毒効果が向上するとともに消毒剤の低減が図られた。なお、活性汚泥処理への移行当初の生物相が生成途上である間は、ノロウイルス除去率が劣ることに留意が必要である。これらの評価結果から、段階的な応急復旧対策に応じた塩素消毒による大腸菌群等の不活化効果が異なることが明らかとなった。

表-4 段階的な復旧対策技術の評価

段階的な復旧対策技術	評価結果
簡易沈殿処理	沈殿汚泥の引き抜き管理が重要
簡易沈殿処理 + 簡易曝気	沈殿処理よりも消毒効果が向上
簡易沈殿処理 + 簡易曝気 + 汚泥の返送 ※	汚泥返送系の仮復旧により、さらに消毒効果が向上
簡易沈殿処理 + 曝気 + 汚泥の返送 ※※	有機物濃度の減少および消毒剤添加濃度の低減
活性汚泥生成による生物処理	活性汚泥処理移行当初は、生物相が生成途上のため安定化を要する

※ 沈殿汚泥の腐敗防止等を目的 ※※ 活性汚泥の生成を目的

## 2.2 水のサイクルの形成による水系感染症拡大事例

平成8年には埼玉県越生町において耐塩素性原虫のクリプトスポリジウムによる水系感染症が発生し、

感染者は9,000人以上にも及んだ<sup>1)</sup>。最初の汚染源については不明確であったが、感染拡大の要因として、河川下流域の水道取水源の上流域に排水処理施設が位置し、その放流水が河川を介して排水処理施設と水道との間を循環(図-6)したことにより被害が拡大したと考えられている<sup>2)</sup>。クリプトスポリジウムは、上下水道で通常行われている塩素消毒レベルでは不活化は困難であり、水のサイクル形成において効果的な除去が行われなかったことにより、我が国最大の水系集団感染が発生した。

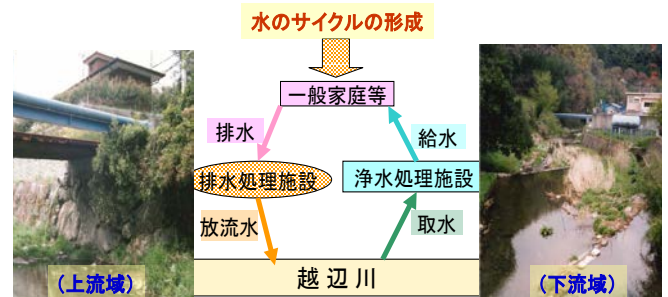


図-6 埼玉県越生町での水のサイクル形成事例

大規模集団感染の発生を契機に下水道においても、その実態把握調査が行われ、クリプトスポリジウムの集団感染が発生していない平常時であれば流入下水中のクリプトスポリジウムの検出濃度・割合は低いですが、集団感染の発生時には高濃度となることが明らかとなっている<sup>3)</sup>。

大規模集団感染を防ぐためには、平常時において、クリプトスポリジウムの濃度を適宜監視して、適切な除去手法を適用するとともに、集団感染発生時には、下水処理場における最大限の除去手法の適用と、水系における総合的対策を取ることが提言されている<sup>4)</sup>。

このため、排水処理施設と浄水場などの利水施設が錯綜している流域では、集団感染発生時における具体的な対策を、下水道・河川・水道等の関連分野全体を対象として構築する必要がある。

## 2.3 下水処理水混入河川水の利用実態例

現在、我が国における下水道普及率は76%に及び河川水量に占める下水処理水量の割合が高まっている。都市化の進展にともない、内陸上流域にも多くの下水処理場があり、その下流域には浄水場などの利水施設が存在している。下水処理水混入河川水の利用実態として、淀川水系での調査例<sup>5)</sup>があり、その利用人口は流域人口の86%にも達している。このことから、内陸部の下水処理場が被災により機



能不全に陥った場合には、その下流域の水利用系における病原微生物感染リスクが増大し、都市部の水利用に大きな影響を及ぼすこととなる。このような流域を全国的に確認し、下水処理場が機能不全となった場合にも、水利用における水系感染防止のための対策を構築する必要がある。

### 3. 感染リスク管理手法構築のために

#### 3.1 緊急対策の効果・実施可能性分析

大規模震災後の下水処理場の機能不全は、従来の技術体系では対応が難しく、感染リスク評価や緊急対策技術が必要となる。今後、感染リスク上昇の抑制策として、下水道における簡易で効果的な対策技術の他、水道水の取水先変更や、水道施設での追加処理、ふん尿のゴミとしての回収など、様々な対策を検討して、その効果や実施可能性を明らかにする必要がある。

#### 3.2 消毒に影響する水質因子とメカニズムの解明

上下水道で行われている消毒法は、塩素消毒が主流であるが、機能不全による処理水質の悪化により消毒効果が低下した。このため、消毒効果低下要因として流入水質、施設堆積汚泥の影響評価が必要であり、有機物やアンモニアが塩素消毒効果に与える影響と代替消毒法の評価が必要である。

#### 3.3 段階的な応急復旧策の課題と解決策の提案

下水道を含めた流域全体における段階的な応急復旧策をリストアップし、その復旧策に応じた感染リスクを、モデル流域について試算することにより、応急対策の実施の可能性を評価する必要がある。さらに、目標とするリスク以下に抑えるための手法を開発する必要がある。

## 4. おわりに

東日本大震災による教訓などから、既存の水質管理システムの脆弱性が明らかとなった。今後、内陸部の下水処理場が被災した場合には、下流域の水利用系への病原微生物に対する感染リスクが増大することが想定される。

本報では、被災により機能不全に陥った下水処理場における実態調査や過去の水系感染症の事例調査から明らかとなった課題を整理するとともに、下水道を含めた水系の応急的な対応策による感染リスク低減手法構築の必要性について考察した。今後、震災時の機能不全を想定した感染リスク低減手法を構築することで、災害時の被害拡大防止に繋がるとともに、水システムの安全性向上に寄与するものと考えられる。

### 参考文献

- 1) Norishige, Y., et al. (2000) Outbreak of Cryptosporidiosis after Contamination of the Public Water Supply in Saitama Prefecture, Japan, in 1996, THE JOURNAL OF THE JAPANESE ASSOCIATION FOR INFECTIOUS DISEASES, 518-526.
- 2) 埼玉県衛生部：クリプトスポリジウムによる集団下痢症報告書、1997.
- 3) 諏訪守、鈴木穰、尾崎正明：クリプトスポリジウム集団感染発生地域の下水処理場におけるオーシストの実態、下水道協会誌論文集、44(538)、pp.151～160、2007.
- 4) 下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会最終報告、(社)日本下水道協会、平成12年3月.
- 5) 住友恒、伊藤禎彦、坂敏彦、大谷真巳：GISを用いた琵琶湖・淀川流域における水利用形態の評価、環境衛生工学研究、12(3)、pp.85～90、1998.

諏訪 守



(独)土木研究所つくば中央研究所材料資源研究グループリサイクルチーム 主任研究員、博士(工学)  
Dr. Mamoru SUWA

津森ジュン



(独)土木研究所つくば中央研究所材料資源研究グループリサイクルチーム 上席研究員  
Jun TSUMORI

鈴木 穰



(独)土木研究所つくば中央研究所材料資源研究グループ長  
Yutaka SUZUKI