

地震被災下水処理場における段階的復旧技術による ノロウイルスの低減効果

諏訪 守・安井宣仁・重村浩之

1. はじめに

東日本大震災による津波被災下水処理場は機能不全に陥り、完全な復旧には長時間を要した。今回の震災では沿岸部に集中したが、水道水源の上流に位置する内陸部の処理場が一時的に機能低下した例もあり、下水処理場の機能不全により、河川・湖沼が汚染の影響を受ける可能性がある。このため、下流域の利水施設に対し病原微生物の感染リスクが高まることを想定する必要がある。

本報文では、衛生的指標である大腸菌群よりも塩素消毒耐性があり、集団感染発生要因となるノロウイルス（NV）を対象に、地震被災下水処理場の段階的な復旧技術におけるNVの低減効果を評価した。次いで、その評価結果を基に段階的復旧技術の放流水による、下流域の利水施設へのNV感染リスクの影響を試算した。

2. 段階的復旧技術によるNVの除去効果

2.1 調査目的

東日本大震災による津波被災下水処理場では、段階的な復旧の緊急対策として、導入の容易さから簡易沈殿処理が多く用いられた。被災の規模や復旧の進展状況によっては、簡易沈殿処理の適用が長期間に及ぶ可能性があり、病原微生物の除去能力の低下や沈殿池に堆積した汚泥が処理水に及ぼす影響による水質悪化が懸念される。実際の被災下水処理場でも、簡易沈殿処理を長期間にわたり行うことで、沈殿池下層に堆積した汚泥が塩素消毒効果へ影響を及ぼす可能性を指摘する報告¹⁾がある。また、段階的な復旧として、被災地域ではガレキなどの廃材が発生していることから、それらをろ材として有効活用を想定した散水ろ床法、加えて、簡易曝気により低濃度の活性汚泥が維持できる接触酸化法の適用が考えられる。これらの生物処理では有機物等の除去が期待でき、余剰汚泥の発生量が少ない利点を有する。

本項では、段階的復旧技術として実下水処理場に

設置した実験装置などを利用して簡易沈殿処理法、散水ろ床法、接触酸化法におけるNV低減効果を明らかにした。さらに、各種の段階的復旧技術による処理水を利用した塩素消毒実験を実施するとともに、除去、消毒効果の向上を目的として凝集剤（PAC）の添加効果や、代替消毒法として紫外線消毒によるNVの低減効果を評価した。

2.2 調査方法

各種の段階的復旧技術によるNVの除去効果の評価は、実下水処理場に設置した以下に示す実験装置を利用した。

簡易沈殿処理法：簡易沈殿処理法の実験装置は最初・最終沈殿池(初沈・終沈)50L、反応タンク100Lで構成されており、沈殿汚泥の引き抜きや反応タンクでの曝気混合は行わず流入下水を継続して流入させた。初沈から終沈までの滞留時間は16時間とし、PACの添加系（攪拌工程の有無）と無添加系の3系列を稼働させた。

散水ろ床法：散水ろ床法の実験装置は、直径300mmの円筒状の容器にプラスチック担体を2.64m充填した。担体の大きさは直径15mm、高さ15mm、厚さ1mmの円筒状、比表面積は450m²/m³であり、散水負荷を10m³/(m²・d)とし流入下水を通水した。

接触酸化法：接触酸化法の実験装置は、嫌気槽(内径36mm、高さ1,200mmの円筒状の容器にプラスチック担体をろ層厚として400mm充填：滞留時間4h)と好気槽(10Lの反応タンクにプラスチック担体を3L充填：滞留時間4h)、沈殿槽(滞留時間20h)より構成され、最初沈殿池流出水を通水した。なお、調査期間中の好気槽のMLSS（浮遊物質濃度）は50～120mg/L程度であった。

ノロウイルスの測定方法

i) 試料の濃縮：ポリエチレングリコールと塩化ナトリウムを添加し、10,000×Gで30分間の遠心沈殿を行い、沈殿物を回収し遺伝子分解酵素を除去した水に再浮遊させてウイルス濃縮液とした。

ii) ウイルスRNAの抽出・精製：ウイルス遺伝子(RNA:リボ核酸)は、グアニジン法によりウイルスたんぱく質を溶解させ、抽出カラムを用いRNAを

抽出した。下水試料には様々なDNA(デオキシリボ核酸)が含まれており、PCR反応(ポリメラーゼ連鎖反応)や逆転写反応の阻害を回避させるためDNAを処理するとともにClean up KitでウイルスRNAを精製した。なお、ウイルス遺伝子抽出カラムへのウイルス濃縮液の通水量は、検出濃度にバラツキが生じないように抽出カラム1本あたり0.05mg-SSとなるように統一した²⁾。

iii) ウイルスRNAの逆転写反応：RNAではPCR反応させられないため、DNAに変換し、逆転写反応キットを利用し、RNAをcDNAに変換した。

iv) リアルタイムPCR法によるcDNAの定量：特定の遺伝子をリアルタイムPCR装置で複製させ、cDNAの定量を行い、試料1リットル当たりのNV濃度(単位：copies/L)を算出した。

その他の水質分析項目として、SSは下水試験方法を準拠、残留塩素はDPD法により測定した。

2.3 調査結果

被災直後の緊急的措置対応としての簡易沈殿処理および簡易沈殿処理へのPAC添加、その後の復旧の進展に応じて適用の可能性がある中級処理としての散水ろ床法、接触酸化法によるNVの推移を図-1、2に示す。図-1の簡易沈殿処理におけるPAC添加前では各系列の処理水のNV濃度に差が見られなかったが、添加後は特にII系(PAC添加攪拌工程有)でのNV濃度が低下傾向を示した。PAC添加後の各系列のNV平均除去率は、I系(PAC無添加)が50%、II系は85%、III系(PAC添加攪拌工程無)は72%であり、攪拌工程を導入したPACの添加系では、他の系列と比較してNVの低減効果がより向上した。

次いで、有機物等の除去が期待でき、余剰汚泥の発生量が少ない利点を有する散水ろ床法と接触酸化

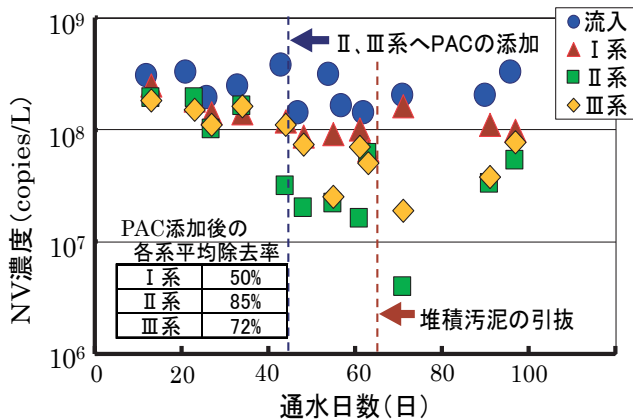


図-1 簡易沈殿処理によるNVの推移

法によるNVの除去効果について図-2に示す。流入下水のNV濃度が 10^7 copies/Lレベル時において、両法の処理水のNV濃度は 10^6 copies/Lレベルで推移しており、除去効果(1log程度)に大差が見られず、標準的な活性汚泥法のNV除去率の2log程度²⁾と比較して低い状況にあった。

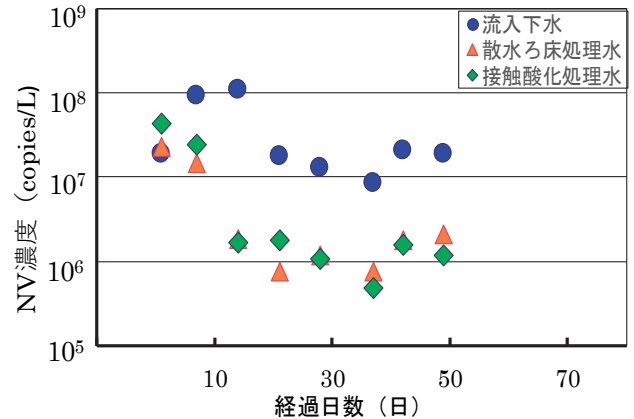


図-2 散水ろ床と接触酸化処理水のNVの推移

上記の連続処理実験の結果に加え、塩素、紫外線消毒の回分実験から得られたデータを含め、Log除去率の平均値と標準偏差を整理し、消毒などの実験条件とともに表-1に示す。これら段階的復旧技術などによるNVの除去率は、流入下水と各復旧技術による処理水の実測値から除去率の変動を考慮し算定した。さらに、各復旧技術によるNVの除去率は対数正規分布に従うと仮定した。段階的復旧技術として紫外線消毒を用いた際は40、100mJ/cm²の紫外線量を平均値として、水質変化(波長254nmの吸光

表-1 段階的復旧技術によるNVの除去率

段階的復旧技術	Log除去率	
	平均値(μ)	標準偏差(σ)
活性汚泥法(消毒分を含まず)	2.0 程度	—
簡易沈殿処理法	0.22	0.33
簡易沈殿処理+PAC(5mgAl/L)	0.72	0.46
簡易沈殿処理+PAC+塩素(5mgAl/L, 225mgCl \cdot min/L)	1.38	0.62
散水ろ床法	0.99	0.50
散水ろ床法+塩素(225mgCl \cdot min/L)	1.24	0.62
接触酸化法	0.84	0.63
接触酸化法+塩素(225mgCl \cdot min/L)	1.14	0.71
接触酸化法+紫外線消毒(100mJ/cm ²)	2.10	0.76
紫外線消毒(100mJ/cm ²)	1.21	0.46
PAC(4mgAl/L)+紫外線消毒(40mJ/cm ²)	1.97	0.50
PAC(4mgAl/L)+紫外線消毒(100mJ/cm ²)	2.58	0.50

度)による照射紫外線量の変動を考慮し線量分布を勘案した。なお、照射紫外線量は正規分布に従うと仮定し、標準偏差(σ)を $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ と仮定した。

簡易沈殿処理法では、NVの除去率は平均値で $0.22\log$ であったのに対し、後段にPAC添加と塩素消毒を適用することで、除去率が $1.38\log$ に向上した。同様に散水ろ床法、接触酸化法、紫外線消毒でも後段または前段に追加処理を加えることでNV除去率の向上が確認された。特に生物処理後やPAC添加による凝集沈殿後に紫外線照射を行うことで、NVの除去効果がより向上した。

3. 段階的復旧技術によるNV感染リスクの低減効果の評価

3.1 評価目的

これまで、水質管理の観点から下水道施設の耐震化や平常時の河川流況を勘案した取水・排水システムの再編成などの提言がなされているが³⁾、被災による下水道施設の機能不全により、下流域に存在する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ため、その低減手法の開発と評価が必要である。

本項では、下流域の水利用に対するNV感染リスクの上昇割合を評価することを目的に、下水処理場における正常運転時と被災後を想定した段階的復旧技術の各放流水について、その比較を行った。

3.2 評価方法

感染リスクの比較にあたっては、**定量的微生物リスク評価手法(QMRA ; Quantitative Microbial Risk Assessment)** ^{*}の1指標である**障害調整生存年数(DALY ; Disability-Adjusted Life Year)** ^{*}に基づき試算を行った。以下に試算の前提条件を示す。

3.2.1 前提条件

- i) 上流域の下水処理場において正常運転がなされ、放流水が河川へ放流の後、下流域の浄水場の水源として利用。浄水処理工程でのNV除去率の変動は無く一定とし、病原微生物リスクは無いものとし、飲料水の摂取による病原微生物リスクがWHOのガイドライン値の 10^{-6} (DALY/人・年)を満たすものとした。
- ii) 上流域の下水処理場が震災等により被災し、段階的復旧により処理された放流水が下流域の浄水場への水源となる場合、浄水場の被災状況は軽微または正常運転を保っているものとした。

3.2.2 リスクの試算条件

次いで、NV感染リスクの試算条件は以下のとおりとした。

- i) 各段階的復旧技術によるNVの除去率は、表-1に示した値を適用した。
- ii) 河川での放流水の希釈効果は、放流先の河川流量等が異なるため、希釈率平均を $1/10$ 、標準偏差を $1/50$ の正規分布に従うと仮定した。
- iii) i ~ ii より処理、希釈された河川水に含まれるNVが下流域の浄水場の水源に存在すると仮定したNV感染リスクとして、DALY値を試算した。式(1)に従い、モンテカルロシミュレーション(試行回数 $=100,000$)によりDALY_{pppy}の分布を算出した。

$$DALY_{pppy} = \{1 - (1 - P_{inf}(D))^n\} \times R_{inf} \times DB \quad \text{式(1)}$$

$$P_{inf}(D) = 1 - \exp\left[-\frac{\ln 0.5}{ID_{50}} \times D\right] \quad \text{式(2)}$$

ここで、DALY_{pppy}は1人1年あたりの疾病負荷(DALY/人・年)、 $P_{inf}(D)$ は感染確率⁴⁾(容量反応モデル 式(2))⁵⁾、 R_{inf} は発症確率(0.8)⁶⁾、DBは疾病負荷(9.0×10^{-4} 年)⁴⁾、Dは摂取NV量(copies/L)、nは曝露日数(365日)、 ID_{50} は50%の確率で発症する摂取NV量である。

3.3 評価結果

各段階的復旧技術による放流水が下流域へ及ぼすNV感染リスクの比較結果を図-3に示す。縦軸は下水処理場が正常運転時において、下流域の浄水場に及ぼすNV感染リスクのDALY_{pppy}の 10^6 (DALY/人・年)を基準(相対値を1)として、各段階的復旧技術の放流水が及ぼす影響割合を表している。すなわち、DALY_{pppy}(各段階的復旧技術) / DALY_{pppy}(正常運転時)を示した。図中の縦軸値が高いほど、段階的復旧技術による放流水が下流域に対してNV感染リスクの影響が大きくなることを表している。簡易沈殿処理では、正常運転時と比較してNVによる感染リスクが約80倍に増大した。簡易沈殿処理の後段にPAC添加と塩素消毒を適用することで、リスクが半分程度に低減されたが、正常運転と比較して約40倍のリスクが存在している可能性が試算された。散水ろ床法、接触酸化法では、簡易沈殿処理と比較してリスクの低減割合が向上したが、正常運転よりも約50~60倍と依然高い値であり、塩素消毒を追加しても大幅なリスクの低減効果が得られなかった。

^{*}土木用語解説：定量的微生物リスク評価手法 (QMRA ; Quantitative Microbial Risk Assessment)

^{*}土木用語解説：障害調整生存年数 (DALY ; Disability-Adjusted Life Year)

一方、紫外線消毒の単独処理(100mJ/cm²)では、正常運転と比較して約27倍であったが、PAC(4mgAl/L)添加による凝集沈殿効果と紫外線消毒により、1.7倍程度までリスクの低減効果が見込まれた。緊急対応時となることから、紫外線消毒の導入には電源の確保等に課題を有するが、復旧の進展状況に応じて適用の可能性が高まることや、塩素などの消毒剤の不足時対応、消毒剤消費物質の影響を受けにくいなどの利点を有する。

なお、本試算ではNVの遺伝子定量値(copies数)を用いていることから、実際の感染価を反映させた場合よりも安全側での試算になっている。

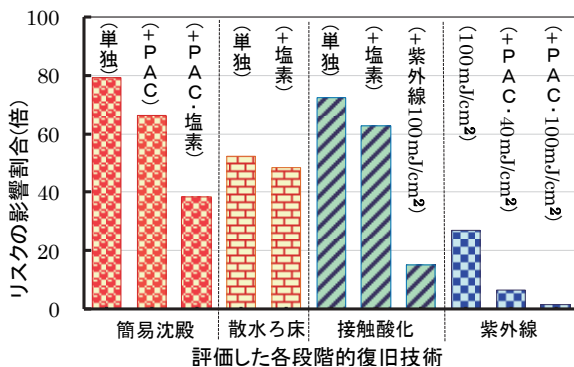


図-3 各段階的復旧技術の放流水が下流域へ及ぼすNV感染リスクの比較

以上より、下水処理場が被災し正常運転が行えない状況に陥った場合には、電力供給前はPAC添加や塩素消毒を組み合わせた複合処理を実施し、電力が回復次第、紫外線消毒を導入することで、下流域の浄水原水に及ぼす病原微生物リスクを低減できると考えられた。

4. まとめ

本報文では、地震被災下水処理場の段階的な復旧技術におけるNVの低減効果を評価した。次いで、その評価結果を基に段階的復旧技術の放流水によ

る、下流域の利水施設へのNV感染リスクの影響を試算した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 攪拌工程を導入したPACの添加効果により、簡易沈殿処理によるNVの低減効果が向上した。
- 2) 標準的な活性汚泥法と比較して、散水ろ床、接触酸化法のNVの除去率は低い状況にあった。
- 3) 病原微生物リスクの低減効果についてNVを指標とし試算した結果、簡易沈殿処理ではPACを添加し塩素消毒を行うことで、単独処理と比較してリスクを半減できる可能性が示された。
- 4) 散水ろ床、接触酸化法では、簡易沈殿処理と比較してリスクの低減割合が向上したが、塩素消毒を追加しても大幅なリスクの低減効果が得られなかった。
- 5) PAC添加による凝集沈殿効果と紫外線消毒を適用することで、大幅なリスクの低減効果が見込まれた。

参考文献

- 1) 諏訪守、安井宣仁、鈴木穰、岡本誠一郎、桜井健介：津波被災下水処理場の段階的復旧対策技術による水質改善効果、下水道協会誌論文集、50(614)、pp.111~120、2013
- 2) 諏訪守、岡本誠一郎、桜井健介：ノロウイルスの除去率に及ぼす下水処理法の影響因子、下水道協会誌論文集、47(571)、pp.103~111、2010
- 3) 緊急時水循環機能障害リスク検討委員会報告書、平成19年3月
- 4) 安井宣仁、諏訪守、桜井健介、鈴木穰、小林憲太郎、高島寛生：農業利用を想定したUF膜処理による下水再生水の定量的微生物リスク評価：ノロウイルスを対象とした事例的研究、土木学会論文集G(環境)、69(7)、pp.647~656、2013
- 5) Masago et al.: Quantitative risk assessment of Noroviruses in drinking water based on qualitative data in Japan, Environ.Sci.Tech., 40(23),pp.7428-7433,2006
- 6) Moe C.L.: Preventing Norovirus Transmission: How Should We Handle Food Handlers? Clin Infect Dis, (48) 38-40, 2009

諏訪 守



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 主任研究員、博士(工学)
Dr. Mamoru SUWA

安井宣仁



研究当時 土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 研究員、現 近畿大学工業高等専門学校、博士(工学)
Dr. Nobuhito YASUI

重村浩之



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 首席研究員
Hiroyuki SHIGEMURA