

震災時の機能不全を想定した水質リスク低減手法の構築に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：材料資源研究グループ（資源循環担当）

研究担当者：植松龍二、諏訪守、安井宣仁

【要旨】

東日本大震災では、沿岸部に位置する下水道施設が津波被災により機能不全に陥り、完全な復旧には長時間を要した。被災地域の他のインフラが復旧するに従い、家庭などから排出される下水が継続して下水道に流入することになるが、下水道が機能不全となった場合には、放流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、水道水源の上流に位置する内陸部の処理場が被災した例もあり、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ため、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。

本研究は、大規模災害による下水処理システムの機能不全に対して、他施策等による緊急対策の実施可能性を整理した上で、下水道において病原微生物の感染リスクを低減させる手法を構築することを目的に、①緊急対策の実施の可能性を分析、②水質悪化が消毒効果へ及ぼす影響、③衛生学的管理手法の構築とした3つの達成目標を掲げ調査、実験を実施した。その結果、壊滅的被災を想定した緊急対策として、応急復旧段階の簡易沈殿処理による衛生学的指標の評価では、大腸菌群（TC）、ノロウイルス（NV）の安定した除去は期待できないため、放流先の利水状況によっては追加対策が必要であると考えられた。水質悪化が消毒効果へ及ぼす影響としては、簡易沈殿処理水に残存する $\text{NH}_4\text{-N}$ などは消毒剤の消費を促進するため、簡易沈殿処理水や水道施設での消毒への影響が懸念された。衛生学的管理手法の構築に関しては、下水処理場の被災後の電力供給前は、PAC添加や塩素消毒を組み合わせ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への浄水原水に及ぼす病原微生物リスクの大幅な低減が見込まれた。

キーワード：震災、機能不全、消毒、水系感染リスク

1. はじめに

東日本大震災の発生に際しては、下水道が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。被災規模が甚大な場合には、復旧にも長時間を要するとともに、復旧段階での処理水質悪化は消毒機能にも影響を及ぼす。

東日本大震災では、被災下水処理場は沿岸部に集中したが、水道水源上流に位置する内陸部の処理場が被災した例もあり、病原微生物の感染リスクが格段に高まることになる。水系水質リスクに対する施策として、これまで、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・排水系統の再編成などの提言がなされているが¹⁾、被災による下水道施設の機能不全により、感染リスクは1万倍以上に上昇すると推定されることから、それに応じたリスク低減手法の開発が必要である。

本研究は、大規模災害による下水処理システムの機能不全に対して、他施策等による緊急対策の実施可能性を整理した上で、下水道において病原微生物の感染リスクを低減させる手法を構築することを目的としている。

このため、機能不全に陥った際の処理水質悪化が消毒効果に及ぼす影響評価、応急対策手法の構築、段階的復旧における課題への解決策の提案を行い、衛生学的リス

ク管理手法を構築するものである。また、衛生学的な指標として、これまでの評価対象である大腸菌群に加えて、塩素消毒に耐性があり集団感染発生要因となるウイルスや原虫類を含める。

下記の1)～3)の達成目標ごとに得られた成果について、とりまとめを行った。

- 1) 緊急対策の実施の可能性を分析
- 2) 水質悪化が消毒効果へ及ぼす影響
- 3) 衛生学的管理手法の構築

2. 研究目的および方法

2. 1 緊急対策の実施の可能性を分析

2. 1. 1 緊急対策としての簡易沈殿処理による大腸菌群やノロウイルスの除去効果

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。簡易沈殿処理水の水質は、通常の前沈殿池を経た一次処理レベルと推定されるとともに、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る。このため、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、沈殿池下層へ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²⁾がある。

簡易沈殿処理による TC、NV、有機物などの除去効果や継続した処理が処理水質に及ぼす影響把握を目的に、パイロットプラントを利用し評価を行った。パイロットプラントは最初沈殿池（初沈）50L、反応タンク 100L、最終沈殿池（終沈）50L で構成されたもので、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 時間とした同一条件にて 3 系列を稼働させた。評価対象試料は、流入下水と施設滞留時間を考慮して採水した終沈越流水とした。

水質測定項目は TC の他、NV とした。TC はデソキシコレート培地による平板培養法によって定量した。NV は、ポリエチレングリコール沈殿法により試料を濃縮し、回収した沈渣を RNase-free 水（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、濃縮液中のウイルスは、リアルタイム PCR 法により定量³⁾を行った。ウイルス遺伝子の抽出は、ウイルス濃縮液から QIAamp Viral RNA Mini Kit (QIAGEN 社) の抽出カラムを用いたグアニジン法とした。抽出試料を DNaseI 処理し、RNeasy MinElute Clean up Kit (QIAGEN 社) でウイルス RNA を精製した。RNA 試料 0.5 μ g をランダムプライマー、Omniscrypt RT Kit (QIAGEN 社) を用い全量 100 μ L の系で逆転写反応を行い cDNA を作製し 10 μ L をリアルタイム PCR に供した。ノロウイルスの検出に用いたプライマー、プローブおよび反応条件は、「ノロウイルスの検出法について」⁴⁾ に準じた。リアルタイム PCR 反応のための試薬は QuantiTect Probe PCR Kit (QIAGEN 社) を用い、リアルタイム PCR 装置は LightCycler (ロシュ・ダイアグノスティックス社) を使用した。逆転写反応に使用する抽出 RNA 量は Spectrophotometer (NanoDrop 社製) により定量した。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³⁾。

2. 2 水質悪化が消毒効果へ及ぼす影響

2. 2. 1 簡易沈殿処理水の水質性状の評価

簡易沈殿処理による処理水質は、初沈流出水と同程度と考えられ、特に TC や NV の高度な除去効果は期待できないと推定され、また、その処理水に残存する有機物などによって塩素などの消毒剤が消費される課題もある。このため、2.1.1 の実験条件を基にして水質評価を行った。

水質測定項目は SS、COD_{Cr}、NH₄-N とした。SS は下水試験方法に準拠して、また、COD_{Cr} は HACH による比

色法、NH₄-N は自動比色分析装置（ビーエルテック社製 QuAAtro2-HR）により測定した。

2. 2. 2 凝集剤の添加効果の評価

簡易沈殿処理での病原微生物の除去性や消毒効果の向上の必要性から、攪拌工程を導入した凝集剤 (PAC) の添加効果の評価を目的に、プラントを利用した連続通水実験を行った。適切な攪拌により凝集反応を促進させる必要があると考えられるが、被災直後の下水処理場で攪拌を伴う効果的な凝集処理を実現することは困難であることが想定される。管渠内などでの攪拌力を利用して凝集を促進させる手法が解決策の一つであると考えられるため、被災現場での導入を容易にするという観点も踏まえ、図-1 に示すような実験系を考案した。実験装置は反応容器内に砂利を充填した簡易なもので、流入下水と PAC を混合させ (5mg-Al/L)、凝集効果の評価することとした。凝集効果の評価においては、最初沈殿池（初沈）50L、反応タンク 100L、最終沈殿池（終沈）50L で構成された 3 系列のプラントを用い、PAC の簡易攪拌方式を取り入れ、凝集混合水を初沈へ流入させた系、直接 PAC を初沈へ添加した系、および PAC の無添加系の計 3 条件を比較した。簡易攪拌のための反応容器の容量は 500mL で砂利の充填量を考慮した滞留混合時間は 1 分間程度であった。また、プラントの反応タンクでは曝気混合は行わず、初沈から終沈までの滞留時間を 16 時間として簡易沈殿処理を行った。実験終了時にはプラントの各系列に堆積した SS を測定し、その収支を把握した。

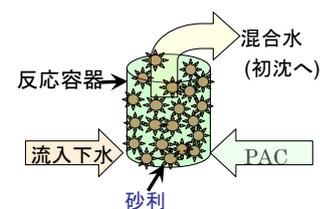


図-1 簡易攪拌方式

評価対象試料は、流入下水と施設滞留時間を考慮して採水した終沈越流水とした。併せて、各処理条件で得られた上澄液試料を用いて塩素消毒実験を行った。塩素消毒条件は、次亜塩素酸ナトリウムを 0~15mg-Cl/L の範囲で添加、接触時間を 15 分間とし、チオ硫酸ナトリウムの添加により残留塩素を中和した。

水質測定項目、測定方法は 2.1.1、2.2.1 と同様である。

2. 2. 3 代替消毒法としての紫外線消毒によるウイルス低減効果の評価

簡易沈殿処理を含めた段階的復旧技術による各種処理水に残存する有機物や NH₄-N により、塩素などの消毒剤が消費される課題がある。これらの課題に対処するためには、消毒剤消費物質の影響を受けにくい紫外線消毒法

の適用も考えられる。緊急対応時となることから、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にも対応できる利点を有する。

このため、流入下水を対象に紫外線消毒による NV 遺伝子の低減効果を把握した。具体的には、上記 2.1 におけるプラントへの流入下水と流入下水へ PAC を添加したその上澄液に低圧紫外線ランプにより 0~100mJ/cm² の線量を照射し、NV の定量を行った。PAC の添加濃度は 4mg-Al/L とした。

2.3 衛生学的管理手法の構築

2.3.1 段階的復旧技術によるノロウイルスの低減効果

被災直後の緊急対策としての簡易沈殿処理や、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、それらの有効活用を想定した散水ろ床法、また、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。上記の段階的復旧技術による NV の除去効果の把握を目的に、各々の実験装置により評価を行った。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 PAC の添加効果についても評価した。散水ろ床実験装置は、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：4h）、沈殿槽（20h）より構成され、沈殿下水を通水した。なお、調査期間中の好気槽の MLSS は 50~120mg/L 程度であった。

2.3.2 段階的復旧技術による病原微生物リスクの低減効果

下水処理場下流域の水利用に対する病原微生物リスクの上昇割合を評価することを目的に、正常の運転時（標準活性汚泥法による処理）による処理水と、段階的復旧技術の処理水について、定量的微生物リスク評価手法を用いて試算し比較を行った。病原微生物リスク評価を障害調整生存年数（DALY）に基づき試算するにあたり、評価の前提条件として下記事項を勘案した。

i) 上流域の下水処理場において正常運転（通常の下水処理工程）で処理された放流水が河川水中に放流され、下流域の浄水場の水源として利用されることを想定し、通常運転下で病原微生物リスクは無いものと想定した。

浄水処理工程での NV 除去率の変動は無いものとし一定と仮定した。

ii) 上流域の下水処理場が正常に機能している場合は、下流域の浄水場への放流水の病原微生物リスクの影響は無いと仮定し、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)を満たすものとする。

iii) 上流域の下水処理場が震災等により被災し、機能が停止および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する。

また、以下の手順に従い、病原微生物リスクの試算を行った。

① 流入下水中の NV 濃度は、実測値に基づき流行情（冬場）の濃度変動から対数正規分布に従うと仮定し、流入下水中の NV 濃度を設定した。

② 各段階的復旧技術における NV の除去率は実測値より平均除去率および標準偏差を算出し、Log 除去率が対数正規分布に従うと仮定した。

③ 段階的復旧技術として紫外線を用いた際は、表-1 に示す紫外線量を平均値として、水質変化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、紫外線線量の分布は正規分布に従うと仮定し、標準偏差 (σ)=20mJ/cm² と仮定した。

④ 正常運転時における下水処理場での標準活性汚泥処理法の NV 除去率は、既往の報告を参照し、平均 =1.6Log、標準偏差=1.0Log に従うとした。

⑤ 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=1/10、標準偏差=1/50 の正規分布に従うと仮定した。

⑥ ②、③により処理、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病原微生物リスクとして、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 (n=100,000) により DALY_{pppy} の分布を算出した。

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

ここで、DALY_{pppy} は 1 人 1 年あたりの疾病負荷 (DALY/人・年)、P_{inf} は感染確率⁵⁾、R_{inf} は発症確率(0.8)⁶⁾、DB は疾病負荷(9.0×10⁻⁴年)⁵⁾、n は曝露日数(365 日)である。なお、P_{inf}、R_{inf}、DB は文献を参照し値を設定した。

⑦ 各段階的復旧技術による放流水が下流域の浄水場へ及ぼす影響として、⑥の DALY_{pppy} の試算結果と、下水処理場が正常運転時の DALY_{pppy}(=10⁻⁶(DALY/人・年))との相対値で比較し、段階的復旧技術による NV のリスク低減効果の評価を行った。

なお、本リスク評価方法は、流入下水の NV 濃度変動、

処理水の除去変動を考慮していることから、不確実性を勘案したものとなっており、信頼性の高い評価方法であると考えられる。また、本試算では定量値として NV の遺伝子定量値 (コピー数) 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点に留意が必要である。

3. 研究結果および考察

3. 1 緊急対策の実施の可能性を分析

3. 1. 1 緊急対策としての簡易沈殿処理による大腸菌群やノロウイルスの除去効果

簡易沈殿処理による TC と NV の除去効果の推移を図-2、3に示す。なお、以下に示す沈殿処理水の TC を含めた全ての指標は、同一条件で稼働させた 3 系列のパイロットプラントの平均値である。流入下水と簡易沈殿処理水の TC に差がなく、平均除去率は 4% (流入と処理後で濃度が逆転の場合は 0%とした) と除去効果は期待できないことが明らかとなった。放流水質基準の TC_{3,000} CFU/mL 以下の達成には、その後の消毒対応となるが、簡易沈殿処理水であることから、通常の生物処理後に行われている塩素消毒の薬剤添加濃度よりも高めた対応とする必要があると考えられた。

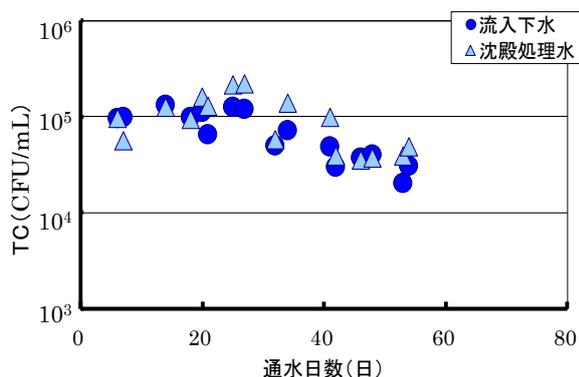


図-2 簡易沈殿処理によるTCの推移

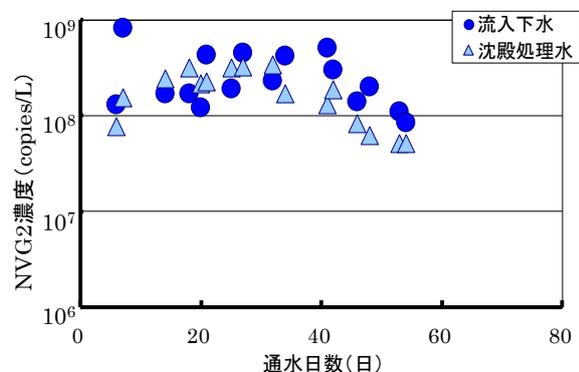


図-3 簡易沈殿処理によるNVG2濃度の推移

NV の濃度推移について図-3に示す。流入下水に比較して沈殿処理水は若干の濃度低下が見られたが、平均除去率は 36%であり、TC よりも若干高いものの、簡易沈

殿処理によって高度に安定したウイルス除去は難しいと考えられた。簡易沈殿処理による高い除去率が得られないため、放流先の利水状況によっては応急的な追加対策の構築が必要である。

3. 2 水質悪化が消毒効果へ及ぼす影響

3. 2. 1 簡易沈殿処理水の水質性状の評価

簡易沈殿処理による SS、COD_{cr}、NH₄-N の濃度推移について図-4~7に示す。流入下水の SS 濃度が変動して簡易沈殿処理水の SS 濃度は比較的安定しており、73% の平均除去率が得られ大腸菌群やノロウイルスよりも除去効果が高い傾向が見られた。また、有機物指標として測定した T-COD_{cr} は流入下水の変動状況に応じた濃度推移を示し、簡易沈殿処理による平均除去率は 38%であった。D-COD_{cr} については、流入下水と簡易沈殿処理水の濃度に差がなく平均除去率は 8%、NH₄-N も同様に 3% と除去効果は低かった。

段階的な復旧の緊急対応として、簡易沈殿処理の SS、COD_{cr}、NH₄-N を指標とした導入効果を評価した。その結果、D-COD_{cr}、NH₄-N の除去効果が低いため、処理水に残存する溶解性有機物などは消毒剤の消費を促進し、簡易沈殿処理後の消毒や水道施設での消毒への影響が懸念されることから、これらの物質の除去効果を高める工夫が必要であると考えられた。SSについては、一定の除去効果が示されたことから、沈殿池内でのフロックの形成が促進されれば、TC や NV の除去効果を高め

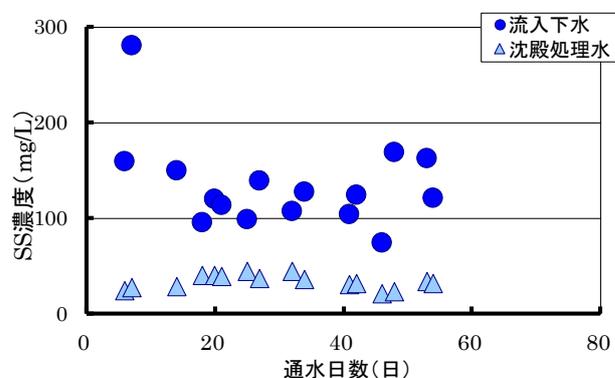


図-4 簡易沈殿処理によるSSの推移

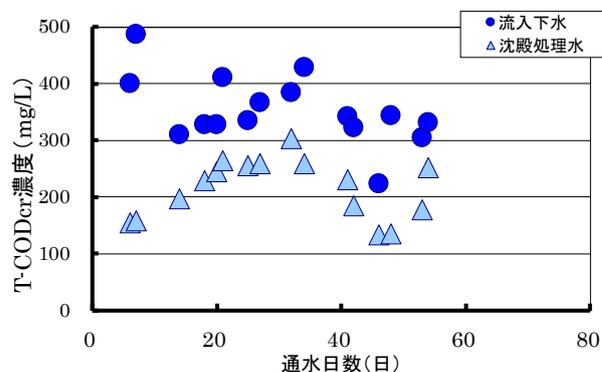


図-5 簡易沈殿処理によるT-CODcrの推移

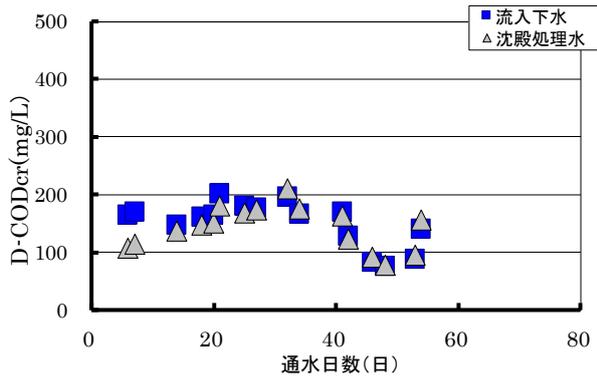


図-6 簡易沈殿処理によるD-CODcrの推移

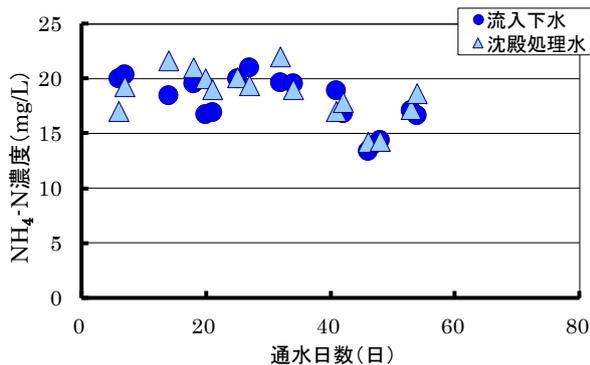


図-7 簡易沈殿処理によるNH₄-Nの推移

られるとともに、有機物の低減効果から消毒剤の消費抑制が図られると考えられる。

3. 2. 2 凝集剤の添加効果の評価

簡易沈殿処理による攪拌工程を導入した PAC の添加効果として、濁度と NV の推移を図-8、9 に示す。図中標記の I 系は PAC 無添加、II 系は添加攪拌工程有、III 系は添加有の攪拌工程無しである。PAC の添加前では各系列処理水の濁度に違いが見られなかったが、PAC 添加後には無添加系と比較して処理水の濁度が低くなり、かつ、攪拌工程を取り入れた II 系は III 系よりもやや安定していた。また、系内に堆積した汚泥を引抜くことにより、各系列処理水の濁度は引抜き前と比較して引抜き直後において低く推移しており、堆積汚泥の引抜き管理は処理水質の観点から重要であると考えられた。

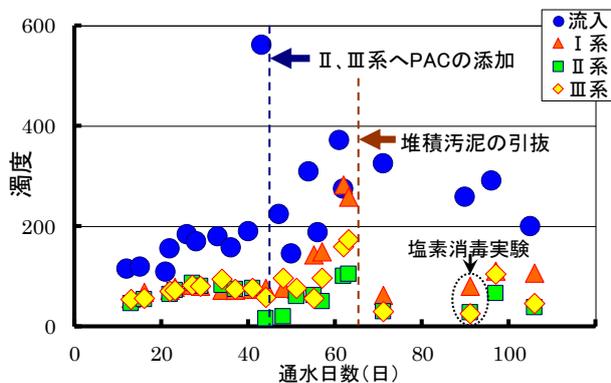


図-8 簡易沈殿処理による濁度の推移

NV の濃度推移について図-9 に示す。PAC の添加前では各系列の NV 濃度に差は見られなかったが、添加後は特に II 系での NV 濃度が低下傾向を示した。添加後の各系列の NV 平均除去率は、I 系が 50%、II 系は 85%、III 系は 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。

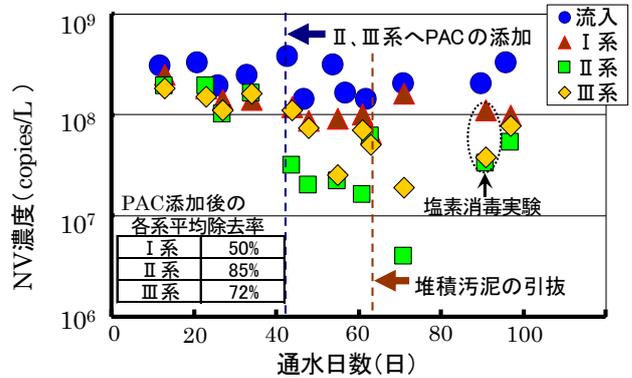


図-9 簡易沈殿処理による NV の推移

次いで、塩素消毒に及ぼす影響評価結果を図-10 に示す。図-8、9 中に塩素消毒実験と記した試料を対象とした。次亜塩素酸ナトリウムの添加濃度に応じて NV の低減効果が高まっており、流入下水の NV 濃度に対する 15mg Cl/L 添加時 (接触時間は 15 分間) の低減効果は I 系が 0.8log、II 系は 1.5log、III 系は 1.2log となった。

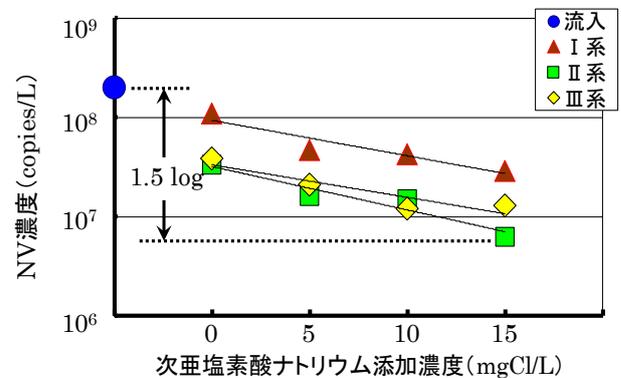


図-10 塩素消毒による NV の低減効果

攪拌工程を導入した PAC の添加条件とし、添加塩素濃度を高めることで、平常時における活性汚泥処理の除去レベルである 2log 程度と同等の効果が得られる可能性があるものと考えられた。同様に、TC を対象とした塩素消毒実験結果を図-11 に示す。PAC の添加系列である II、III 系では、添加塩素濃度が 5mg Cl/L で放流水質基準値以下となった。攪拌工程を導入した II 系では、塩素消毒による TC の不活化効果や添加塩素濃度に対する残留塩素濃度の割合がより高まった (図-12)。

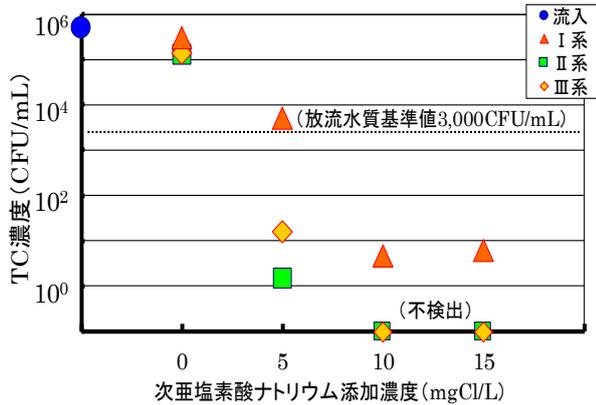


図-11各系列処理水のTCの不活化効果

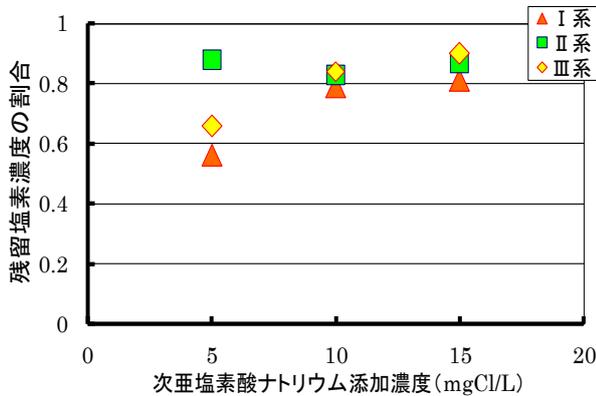


図-12 添加塩素濃度に対する残留塩素濃度の割合

TC、NV 以外の水質項目の結果を図-13～15 に示す。
 NH₄-N、D-COD_{Cr} については、流入下水と各系列の処理水に大きな違いが見られず、PAC の添加による溶解性物質の除去効果は期待できない。また、T-COD_{Cr} についても、PAC 添加により若干の改善傾向が見られたものの、D-COD_{Cr} の影響により改善効果は限定的であると考えられた。より消毒効果を高めるためには消毒剤を消費する物質の濃度をさらに低減させる必要があるが、その手法については別途に考慮する必要がある。

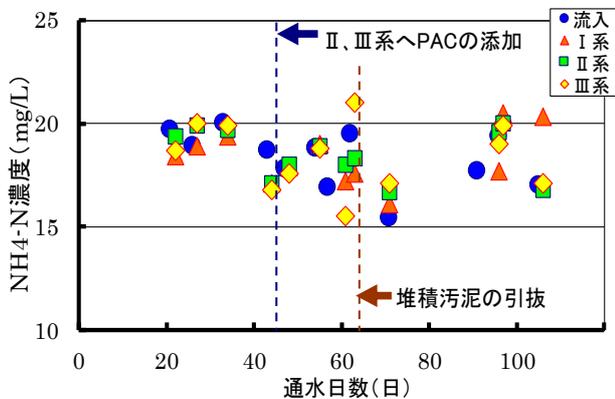


図-13 簡易沈殿処理によるNH₄-Nの推移

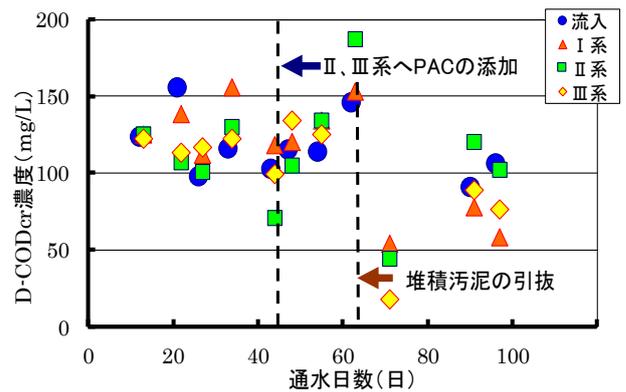


図-14 簡易沈殿処理によるD-COD_{Cr}の推移

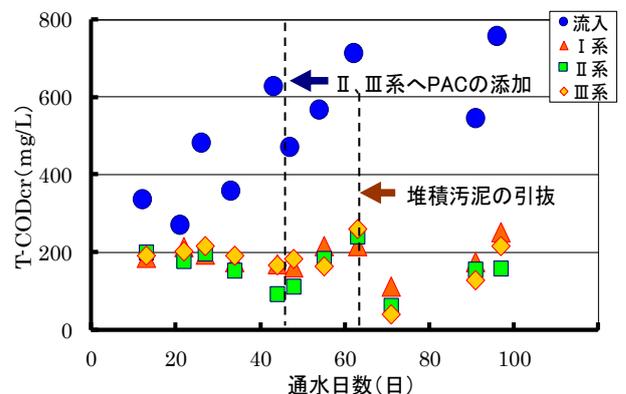


図-15 簡易沈殿処理によるT-COD_{Cr}の推移

一方、図-16 は通水日数が 63 日目における堆積汚泥の引抜き時から実験終了時にかけて各系列のプラント内に堆積した SS 量を測定し、その物質収支の把握を行ったものである。PAC の添加有無に関わらず各系列の初沈での堆積 SS 量はほぼ同じであったが、反応タンク以降に大きな違いが生じていた。I 系の無添加系列では流入する SS の多くが初沈に堆積していたが、反応タンクから終沈へ移行するにつれ、堆積 SS 量は減少傾向を示した。しかし、PAC の添加系列では反応タンク内での堆積 SS 量は初沈よりも多くなっていることから、反応タンク内においてフロックが生成し堆積することで、堆積

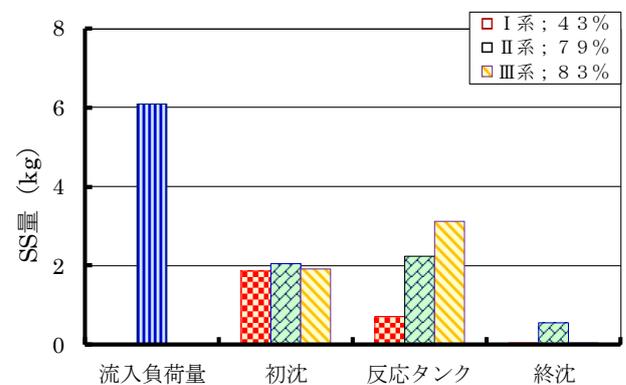


図-16 各系列のプラント内の堆積SS量

SS量が増加したものと推定された。また、流入負荷に対して各系列内で堆積していたSSの割合は、I系では約40%、II、III系では約80%となった。

3. 2. 3 代替消毒法としての紫外線消毒によるノロウイルス低減効果の評価

上記3.2.2の結果から、簡易沈殿処理時におけるPACの添加によってもD-COD_{Cr}やNH₄-Nなどの除去効果は低く、処理水に残存するこれらの溶解性物質などは消毒剤を消費すると考えられる。消毒剤を消費する物質の低減策については、別途に考慮する必要があるとともに、耐塩素性病原微生物であるウイルスや原虫類に対する課題がある。これらの課題に対処するために、紫外線消毒法の適用について評価した。

結果を図-17に示す。流入下水に対し100mJ/cm²程度の紫外線照射量で、NVの低減効果は0.9logであった。PACの添加濃度を4mg-Al/Lとした流入下水の上澄液に対しては30mJ/cm²程度の紫外線照射と凝集沈殿による効果により、流入下水のNV濃度と比較して1.3logの低減効果が得られた。通常の活性汚泥処理水に対しては40mJ/cm²の照射線量で、NVの低減効果は1log程度であることから⁷⁾、流入下水へPACを添加することで通常の活性汚泥処理水に対する紫外線照射効果と同レベルの低減効果が得られていた。また、100mJ/cm²程度とした照射線量においては、PACを添加することでNVの低減効果が0.9logから2.5logに向上した。

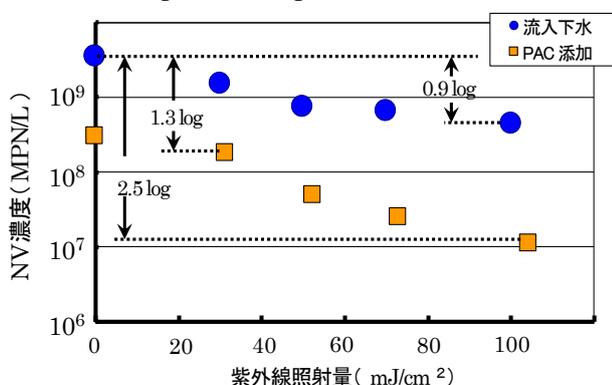


図-17 紫外線によるNVの低減効果

一方、20mJ/cm²の紫外線照射量にて原虫類のクリプトスポリジウムに対し4log程度の不活化効果が得られる報告⁹⁾があることから、紫外線消毒法の適用はウイルスに加え原虫類への有効な対策となる。

3. 3 衛生学的管理手法の構築

3. 3. 1 段階的復旧技術によるノロウイルスの低減効果

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法によるNVの除去効果について図-18に示す。流入下水のNV濃度が10⁷copies/Lレベル時において、ともに処理水のNV濃度は

10⁶copies/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と比較して、NVの除去率は低い状況にあった。

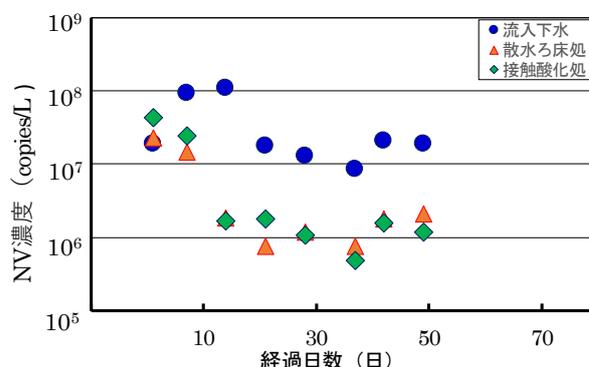


図-18 散水ろ床と接触酸化処理水のNV濃度の推移

上記の調査・実験結果において、被災後の緊急的措置対応の簡易沈殿処理から、簡易沈殿処理による凝集剤の添加効果、復旧の進展に応じて適用の可能性が考慮できる中級処理としての散水ろ床法、接触酸化法、さらには紫外線消毒法などを対象とした病原微生物の除去・消毒効果を評価した。それらの結果としてLog除去率の平均値および標準偏差を整理し表-1に示す。これら段階的復旧技術によるNVの除去率は、流入下水と各復旧技術による処理水のNV濃度の実測値から除去率の変動を考慮し算定した。各復旧技術によるNVの除去率は対数正規分布に従うと推定された。なお、塩素、紫外線消毒での除去率は回分実験によるデータを基に算出した。

簡易沈殿処理では、NVの除去率は平均値で0.22logであったのに対して、後段にPAC添加、塩素処理を適用することで、除去率が1.38logに向上することが確認された。

表-1 各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)
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·min/L)	1.38	0.62
散水ろ床法	0.99	0.50
散水ろ床法+塩素(225mgCl· min/L)	1.24	0.62
接触酸化法	0.84	0.63
接触酸化法+塩素(225mgCl· 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
紫外線消毒(40mJ/cm ²) +PAC(4mgAl/L)	1.97	0.50
紫外線消毒(100mJ/cm ²) +PAC(4mgAl/L)	2.58	0.50

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。

3. 3. 2 段階的復旧技術による病原微生物リスクの低減効果

表-1 に示した処理条件と除去率を基に、各段階的復旧技術による処理水が放流先下流域へ及ぼす病原微生物リスクの比較を図-19 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原水に及ぼす病原微生物リスクの *DALY pppy* を基準（相対値を 1）として、各段階的復旧技術の処理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）を示している。図中の縦軸値が高いほど、段階的復旧技術により放流された処理水が下流域に対して病原微生物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 による病原微生物リスクが約 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、接触酸化法では各々単独処理により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。一方、紫外線消毒を適用することで、PAC（4mgAl/L）添加による凝集沈殿効果と紫外線消毒（線量 100 mJ/cm²）により、正常運転と比較して 1.7 倍程度までリスクの低減効果が見込まれた。

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、下流域へ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。

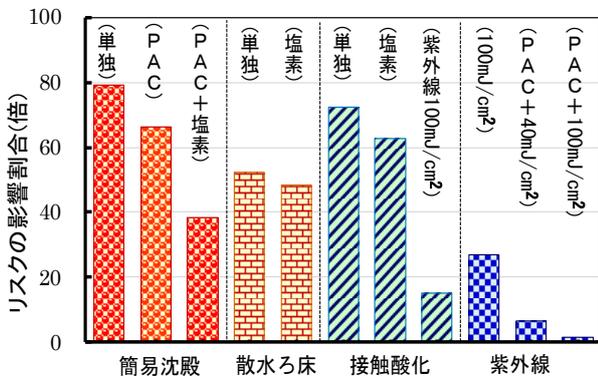


図-19 各復旧技術の処理水が下流域へ及ぼす病原微生物リスクの比較(下水処理場の正常処理を1とした場合)

4. まとめ

本研究は、大規模災害による下水処理システムの機能不全に対して、他施策等による緊急対策の実施可能性を整理した上で、下水道において病原微生物の感染リスクを低減させる手法の構築を目的に実施した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 緊急対策としての簡易沈殿処理では、TC、NV の高い除去率が得られないため、放流先の利水状況によっては応急的な追加対策の構築が必要である。
- 2) 簡易沈殿処理では D-COD_{Cr}、NH₄-N の除去効果が低いため、処理水に残存する溶解性有機物などは消毒剤の消費を促進し、簡易沈殿処理後の消毒や水道施設での消毒への影響が懸念された。
- 3) 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 の除去効果や TC に対する塩素消毒効果を高められると考えられた。
- 4) 簡易沈殿池内に堆積した汚泥を引抜くことにより、処理水の濁度は低く推移したことから、堆積汚泥の引抜き管理は処理水質の観点から重要であると考えられた。
- 5) 簡易沈殿池内に堆積した SS 量は、流入 SS 負荷量に対し、PAC の無添加系で約 40%、添加系で約 80%であった。
- 6) 100mJ/cm²程度とした紫外線照射線量においては、PAC を添加することで NV の低減効果が 0.9log から 2.5log に向上した。
- 7) 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。
- 8) 散水ろ床、接触酸化法では各々単独処理により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。
- 9) 各種段階的復旧技術による病原微生物リスクの低減効果を比較した結果、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) 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。
- 2) 諏訪守、安井宣仁、鈴木穰、岡本誠一郎、桜井健介 (2013) 、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)、111-120。
- 3) 諏訪守、岡本誠一郎、尾崎正明、陶山明子 (2009) 、下水処理のノロウイルス除去効果とその検出濃度に及ぼす濃縮法の影響、

下水道協会誌論文集、46(561)、91-101.

- 4) 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課 (2007)、ノロウイルスの検出法について.
- 5) 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
- 6) Moe C.L.: Preventing Norovirus Transmission: How Should We Handle Food Handlers?, Clin Infect Dis, (48), pp.38-40, 2009.
- 7) 安井宣仁, 諏訪守, 桜井健介, 津森ジュン (2014) 、下水処理水を対象とした紫外線照射におけるノロウイルスの除去特性、第 17 回日本水環境学会シンポジウム講演集、141-142.
- 8) USEPA (1999) Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in Drinking Water, EPA/600 / R-98/160,May.

STUDY ON DEVELOPMENT OF WATER QUALITY RISK DECREASE TECHNIQUE FOR ASSUMING DYSFUNCTION OF WASTEWATER TREATMENT AT EARTHQUAKE DISASTER

Research Period: FY2013–2016

Research Group: Materials and Resources

Research Group

Authors: Ryuji UEMATSU

Mamoru SUWA

Nobuhito YASUI

Abstract: A long time was required for the restoration of wastewater treatment plant seriously damaged by Tohoku-Pacific Ocean earthquake in 2011. Stepwise restoration technologies were adapted for the improvement of final effluent quality, and it should be very important that the contribution and problems of the technologies for the sanitary safety be clarified, because such information is quite useful as our rare experience for the possible future damages.

The aim of this study is to clarify the biological removal and chlorine disinfection effect of the pathogenic microorganisms when stepwise restoration technologies were adapted to the damaged wastewater treatment plant. And, development of restoration technology to greatly reduce concentration of pathogenic microorganisms is necessary with wastewater treatment processes.

The results are as follows; The effect of chlorine disinfection and removal of the pathogenic microorganisms was different according to the restoration level of the technological countermeasures. In the early stage when only sedimentation was applied, the withdrawal of sludge was important, because the accumulated sludge deteriorated the chlorine disinfection effect by forming substances which consumed chlorine. The addition of poly-aluminum chloride (PAC) to the primary effluent caused the improvement of disinfection effect. When trickling filter or contact aeration process was applied, chlorine disinfection effect was improved compared with the sedimentation alone. Additionally, to improve the pathogenic microorganisms removal efficiency of the stepwise restoration technologies, ultraviolet disinfection was investigated. In the ultraviolet disinfection of 100mJ/cm² irradiation after PAC had been added to the wastewater influent, the effect of a great decrease of the water-borne infectious risk was estimated.

Key words: earthquake disaster, dysfunction, disinfection, water quality risk