

ノロウイルスの衛生学的リスク評価に基づく下水処理方法の選定手法の検討と導入コスト・エネルギーの試算

松橋 学・板倉 舞・山下洋正

1. はじめに

ノロウイルスは、毎年多くの感染事例があり、特に幼児や高齢者が感染し重症化することで、死亡する事例も報告されている¹⁾。手指や食品などから経口で感染し、ヒトの腸管で増殖し、糞便等には大量のウイルスが排出される。一方、下水処理場は家庭等から排出される糞便を含めた汚水を集め、汚濁物質を除去し放流する施設である。また、下水処理場では凝集沈殿又は紫外線やオゾンによる消毒など効率的にウイルスを除去することが可能な方法が用いられている。過去の調査ではノロウイルスの流行期（冬季）は非流行期に比べ下水処理場に流入するノロウイルス濃度が平均で2桁程度高くなることや通常の下水処理により平均して99%以上のノロウイルス除去が可能であることも確認されている²⁾。しかし、既存施設を用いてより多くのウイルスを除去するためには、処理時間を長くすることや消毒強度を強くするなどコストやエネルギーが今まで以上に必要となる。

このことから本研究では、ノロウイルスによる感染を代表的な衛生学的リスク評価指標とし、設定した衛生学的リスク値を満たすために必要な除去率を放流先の水利用ごとに算出した。また、必要除去率を満たす水処理・消毒方法の組み合わせを抽出するための算出手法を構築し、抽出した処理、消毒方法を導入するためのコスト・エネルギー量を試算した。

2. ノロウイルスの感染リスクの設定と下水処理水の放流先水利用を考慮した必要除去率の算出

2.1 ノロウイルスによる感染リスクの設定

衛生学的リスクを設定するためには、年間感染確率を求めることが必要である。年間感染確率は諸外国において疫学的な調査により許容限界値を

設定している事例がある。本研究では分析を行うため年間感染確率（衛生学的リスク値）を諸外国の知見^{3),4)}を参考に 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 人 \cdot 年 $^{-1}$ の3段階のレベルを設定した。

2.2 流入水中のノロウイルス濃度の推定

まず下水処理場への流入水中のノロウイルス濃度について、「下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書」²⁾で調査された国内18カ所の流入水中のノロウイルスGIIの濃度データを用いて、流行期（11月～3月）、非流行期（4月～10月）ごとに推定を行った。流入水濃度は、流行期、非流行期のそれぞれで濃度が対数正規分布に従うと仮定し、母数の推定を行った。また、回帰式の累積確率50%（ノロウイルス濃度データの50パーセンタイル値）に対応する濃度を幾何平均 μ とした。対数値の標準偏差は縦軸をノロウイルスの濃度データの対数値、横軸を濃度データの対数値の正規化値（濃度データの非超過確率について標準正規化分布の累積分布関数の逆関数）をプロットしたときの傾きより算出した（表-1）。

2.3 水利用側の想定ノロウイルス濃度の設定

水利用側で想定されるノロウイルス濃度を設定する。最もノロウイルス濃度が高い状態（除去率ゼロ）を想定し、表-1で設定した流入水濃度（流行期の幾何平均： 7.83×10^5 copies/L、非流行期の幾何平均： 1.28×10^4 copies/L）とした。後述の検討で幅のある濃度域での感染確率を求める必要があることから下に1logずつ異なる濃度を流行期、非流行期それぞれ10ケース設定した（表-2）。

表-1 流入水中のノロウイルスGII濃度の設定

	処理場の流入水	
	流行期 11月～3月	非流行期 4月～10月
平均 対数ln(X)	13.6	9.45
標準偏差 対数ln(X)	2.19	2.56
幾何平均 μ (copies/L)	7.83×10^5	1.28×10^4

表-2 水利用側のノロウイルス濃度の想定ケース

平均値	濃度(copies/L)		平均値	濃度(copies/L)	
	流行期	非流行期		流行期	非流行期
ケース1	7.83×10^5	1.28×10^4	ケース6	7.83×10^0	1.28×10^{-1}
ケース2	7.83×10^4	1.28×10^3	ケース7	7.83×10^{-1}	1.28×10^{-2}
ケース3	7.83×10^3	1.28×10^2	ケース8	7.83×10^{-2}	1.28×10^{-3}
ケース4	7.83×10^2	1.28×10^1	ケース9	7.83×10^{-3}	1.28×10^{-4}
ケース5	7.83×10^1	1.28×10^0	ケース10	7.83×10^{-4}	1.28×10^{-5}

Estimated Cost and Energy for Introducing Different Sewage Treatment Methods Bases on Hygienic Risk Assessment of Norovirus

2.4 各利用用途における摂取水量および曝露頻度の決定

放流先での水利用用途別の曝露頻度・摂取水量は、過去の知見^{5),6)}を参考に表-3のとおり設定した。水浴（全身浴）利用は、夏季に利用が集中するものとして流行期は設定せず全て非流行期に含めた。水道利用は月数で按分し流行期及び非流行期に分けて算出することとした。

表-3 放流水利用用途別の曝露頻度・摂取水量

項目	放流水利用用途	
	水浴(全身浴利用) ⁵⁾	水道利用 ⁶⁾
被曝露者	水浴者	水道利用者
曝露形態	水浴中の誤飲	水道水の飲用利用
曝露頻度	8回/年	365日/年 (流行期152日)
摂取量	30mL/回	1000mL/日

2.5 感染確率の算出のためのモデル

感染確率の算出には、まず1回当たりの曝露により感染する確率を想定することが必要である。1回当たりの感染確率は、ヒトが感染する、あるいは発病するリスクがどの程度であるかを微生物濃度の曝露量、つまり用量から決定するモデル⁷⁾(用量反応モデル)で算出できる。用量反応モデルは複数提案されているが、本研究では、βポワソン型用量反応モデルを用いた(式(1))。

$$P = 1 - (1 + D/\beta)^{-\alpha} \quad \text{式(1)}$$

ここで、Pは曝露1回当たりの感染確率、Dは1回当たりの用量(曝露するノロウイルス粒子数)であり、パラメーターは $\alpha = 0.631$ 、 $\beta = 6.5 \times 10^5$ と設定⁸⁾した。なお、本研究では、水を利用する全員がウイルスに同等の感受性を示すと仮定した。

2.6 年間感染確率の算出

年間感染確率はモンテカルロ法を用いて算出した。はじめに表-3の年間曝露頻度(n)の回数分、ウイルス濃度分布に従ってウイルス濃度を発生させた。なお、算出に必要なウイルス濃度の発生のための乱数等の計算は、Microsoft Excelを用いた。次に、摂取水量を掛け合わせウイルス摂取量を求め、それぞれに用量反応モデルの式(1)を適用して、1回当たりの感染確率 P_i (i回目の感染確率)を算出した。そして、1人の年間感染確率 P_Y を式(2)より求めた。

$$P_Y = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \cdots (1 - P_n) \quad \text{式(2)}$$

また、この計算をそれぞれのケース毎に

10,000人分繰り返し、年間感染確率分布を求めた。これにより得られた感染確率分布において、安全側のリスク評価として、90%信頼区間における上限値である上位2.5%値を年間感染確率の代表値とした。

この結果から、表-2で想定したノロウイルス濃度に対する年間感染確率について、2.1で設定した衛生学的リスク値の範囲で両対数軸をとり、近似式を作成した。

2.7 必要除去率の算出

2.6で作成した近似式を用いて2.1で想定した衛生学的リスク値に対応するノロウイルス濃度を算出した。その結果、水浴(全身浴)では $2.97 \times 10 \sim 2.79 \times 10^{-1}$ (copies/L)、水道利用では $2.36 \times 10^{-1} \sim 3.84 \times 10^{-5}$ (copies/L)となった。このノロウイルス濃度に下水処理場から河川等へ放流した場合の希釈倍率を10倍、水道利用の場合は放流時の希釈に加え、浄水処理による除去を $3.2 \log$ として考慮し、衛生学的リスク値を満たすために必要な放流水のノロウイルス除去率(必要除去率)を算出した(表-4)。

表-4 衛生学的リスク値を満たすために必要な放流水のノロウイルス除去率(log)

衛生学的リスク値	放流水利用用途	
	水浴(全身浴利用)	水道利用
10^{-3}	1.63	2.32
10^{-4}	2.65	3.32
10^{-5}	3.66	4.32

3. 水処理、消毒プロセスによる除去率の算出方法の設定と必要除去率を満たす処理、消毒方法の抽出

3.1 水処理方法ごとの除去率の設定

水処理方法は、標準活性汚泥法(標準法)・オキシデーションディッチ法(OD法)・嫌気無酸素好気法(A2O法)の3ケースとしノロウイルス除去率は、文献値^{2),9)}より表-5のとおり設定した。また、水処理方法と後述の消毒方法の組み合わせで必要除去率を満たすことができない場合を考慮し、付加プロセスとして、凝集剤添加および砂ろ過施設を設定し、ノロウイルス除去率は、水処理と同様に文献値^{2),9)}より表-5のとおり設定した。

表-5 水処理、付加プロセスの除去率の設定

	除去率	運転条件
水処理方法	標準活性汚泥法 ²⁾	2.59 log(99.74%)
	オキシデーションディッチ法 ²⁾	2.82 log(99.85%)
	嫌気無酸素好気法 ²⁾	2.60 log(99.75%)
付加プロセス	凝集剤添加 ⁹⁾	0.50 log(68.37%) 注入率:3mg-Al/L
	砂ろ過 ²⁾	0.20 log(36.90%) ろ過速度:300m/日

3.2 消毒方法による除去率の設定

消毒方法は、塩素消毒・紫外線消毒・オゾン消毒を想定し、除去率はメーカーヒアリングや参考文献²⁾を基に標準設計を設定した。また、塩素消毒、紫外線消毒については1.5倍の能力としたときの除去率も設定した(表-6)。

なお、水処理方法のみで必要除去率が満たされる場合、消毒が不要とはせず、一般的な大腸菌群等を不活化するための塩素消毒を行うものとした。また、標準法では夏季以外は硝化が進行せず、アンモニアが塩素と結合しクロラミンなどの結合塩素となり消毒効果が減少することから「塩素消毒のノロウイルス除去効果なし」と設定した。A2O法・OD法は通年で、完全硝化可能なため「塩素消毒効果あり」と設定した。

表-6 消毒方法の除去率の設定

消毒方法	対数除去率(Log)	消毒条件
塩素消毒(標準設計)	0.90	注入率3.0mg/L Ct値6.3(mg/L・min)
塩素消毒(能力1.5倍)	2.66	注入率4.5mg/L Ct値9.3(mg/L・min)
紫外線消毒(標準設計)	0.00	照射量:40(mJ/cm ²)
紫外線消毒(能力1.5倍)	0.24	照射量:60(mJ/cm ²)
オゾン消毒	2.36	注入率:10(mg/L)

3.3 必要除去率を満たす水処理・消毒方法の抽出

必要除去率を満たす水処理・消毒方法は、放流先での水利用状況に応じた必要除去率より水処理、付加プロセス及び消毒方法の除去率の和が大きくなる組み合わせを抽出することができる。

抽出の結果、衛生学的リスク値 10^{-3} では、水浴利用(1.63log)及び水道利用(2.32 log)共に、水処理のみの除去率(表5)で必要除去率を満たし、消毒における除去が不要であった。水浴利用における衛生学的リスク値 10^{-4} に相当する除去率を満たす処理・消毒方法を表-7に示し、同様に水道利用・リスク値 10^{-5} の場合を表-8に示した。水浴利用・リスク値 10^{-4} では、消毒として紫外線も適用可能であり、標準法と塩素消毒の組み合わせも適用可能(水浴は夏季のみのため硝化進行でアンモニア影響なし)であったが、最も厳しい条件である衛生学的リスク値 10^{-5} における水道利用では消毒方法として紫外線は活用できず、オゾン消

毒又は標準法以外で塩素消毒を標準の1.5倍とすることにより(標準法では夏季以外はアンモニア影響で塩素消毒の効果なしと設定)必要除去率を満たすことができる結果となった(表-8)。

なお、紫外線消毒のろ過との組み合わせによる除去率向上や、標準法における硝化の適切な管理による塩素消毒の除去率向上などが想定しうるが、本研究では、安全側の除去率の設定するため考慮していない点に留意が必要である。

表-7 水浴利用時の衛生学的リスク値 10^{-4} に相当する除去率を満たす処理・消毒方法の抽出結果一覧

水処理方法	付加プロセス	消毒方法	除去率(log)	
標準法	-	-	塩素(標準)	3.49
	凝集剤	-	紫外線(標準)	3.02
	-	-	紫外線(1.5倍)	2.83
	-	-	オゾン	4.95
OD法	-	-	塩素(標準)	3.72
	-	-	紫外線(標準)	2.82
	-	-	オゾン	5.18
A2O法	-	-	塩素(標準)	3.50
	-	砂ろ過	紫外線(標準)	2.80
	-	-	紫外線(1.5倍)	2.84
	-	-	オゾン	4.96

「-」付加プロセスなし

表-8 水道利用時の衛生学的リスク値 10^{-5} に相当する除去率を満たす処理・消毒方法抽出結果一覧

水処理方法	付加プロセス	消毒方法	除去率(log)	
標準法	-	-	オゾン	4.95
OD法	-	-	塩素(1.5倍)	5.48
	-	-	オゾン	5.18
A2O法	-	-	塩素(1.5倍)	5.26
	-	-	オゾン	4.96

4. コスト・エネルギー消費量試算

コスト試算では、水処理施設及び塩素消毒施設は流域別下水道整備総合計画調査指針と解説¹⁰⁾により、紫外線消とオゾン消毒は過年度調査結果により、算出した。維持管理費は表-9に示す算出条件を用いた。またエネルギー消費量は、各水処理方式の容量計算から主要設備容量を設定し、運転条件に応じた電力消費量を算出した。日最大汚水量は、標準法及びA2O法は10、50、100千m³/日、OD法は2、5、10千m³/日と設定した。図-1に汚水量10千m³/日の条件の衛生学的リスク値 10^{-4} に相当する除去率を満たす処理・消毒方法(表7)試算例を示す。OD法+塩素消毒が最も有利な組み合わせとなった。一方、オゾン消毒は、コスト・エネルギーが最大であったが、最も優れた除去率があり脱色・脱臭の効果も含めて総合的な導

入判断が必要である。また表-8の衛生学的リスク値 10^{-5} に相当する水道利用の場合、最も経済的となる処理・消毒方法は、OD法+塩素（1.5倍）の組み合わせとなった。

表-9 維持管理費算出条件

工程	算出条件
電力費	電力量×電力単価(15円/kwh) 日平均処理水量×注入率(PAC)×365
薬品費	りん用凝集剤(PAC):32円/kg 消毒用次亜塩素酸ナトリウム:33円/kg 消毒用固形塩素剤:800円/kg
補修費	機器費の3%

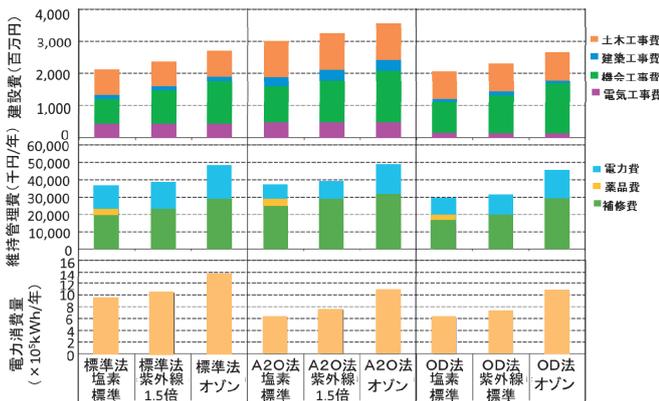


図-1 水浴利用における衛生学的リスク値 10^{-4} 相当除去率を満たすことができる水処理・消毒方法の建設費・維持管理費・電力消費量の試算例

5. まとめ

本研究の成果を以下に述べる。

①ノロウイルスによる感染を代表的な衛生学的リスク評価指標とし、放流先の水利用用途に応じたノロウイルスの必要除去率を算出するとともに、水処理・消毒方法の除去率をそれぞれ施設ごとに設定することで、必要除去率を満たす水処理・消毒方法の組み合わせを抽出するための算出手法を構築した。

②本研究で最も厳しい条件である衛生学的リスク値 10^{-5} に相当する水道利用のノロウイルス除去率（4.32log）は、標準法ではオゾン消毒のみ、

OD法及びA2O法ではオゾン消毒又塩素消毒（1.5倍）の組み合わせにより満たすことができ、最も経済的な試算となる処理・消毒方法は、OD法+塩素（1.5倍）の組み合わせとなった。

本研究における紫外線消毒のろ過との組み合わせによる除去率向上や、標準法における硝化の適切な管理による塩素消毒の除去率向上などを考慮した検討を引き続き行いたいと考えている。また、下水道事業者が、社会で求められるリスク制御レベルとコスト・エネルギーのバランスを考慮した下水処理施設の導入を検討する際に本成果の活用が期待される。

参考文献

- 1) 厚生労働省HP：ノロウイルスに関するQ&A
- 2) 国土交通省：下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書、2010
- 3) METCALF & EDDY：WATER REUSE、p245、2007
- 4) 伊藤禎彦：オランダの水事情、空調調和・衛生工学、第85巻、第9号、pp.9～16、2011
- 5) 高度処理会議：ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生水利用検討マニュアル、2001
- 6) 小越眞佐司、藤原隆司、對馬育夫：下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究、平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料、pp.121～126、2010
- 7) 土田武志、福土謙介、田中宏明、大村達夫：環境水における病原性微生物数の確率分布を考慮したリスクモデル、土木学会論文集、No.615/VII-10、pp.61～68、1999.2
- 8) Teunis, P. F. M., Moe, C. L., Liu, P., Miller, S. E., Lindesmith, L., Baric, R. S., Pendu, Le J. and Calderon, R. L.: Norwalk Virus: How Infectious is It?, J. Med. Virol., 80, pp.1468-1476, 2008
- 9) 岡本誠一郎、諏訪守、桜井健介：下水道におけるウイルス等の安全性評価に関する調査、平成20年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料、pp.13～29、2009
- 10) 国土交通省：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説、2015

松橋 学



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 研究官
Manabu MATSUHASHI

板倉 舞



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室研究官、現 国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所
Mai ITAKURA

山下洋正



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室長
Hiromasa YAMASHITA