

4. 処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 小越 眞佐司
研究官 板倉 舞
交流研究員 前田 光太郎

1. はじめに

現在、下水処理場からの放流水に関する衛生学的指標として大腸菌群数が用いられているが、土壌由来の細菌や環境中で増殖する細菌が含まれるなど、糞便性汚染を示す指標として妥当性が低いことが指摘されている。水質環境基準項目が大腸菌群数から大腸菌数に変更される予定であることを踏まえ、著者らはこれまでに実下水処理場での大腸菌群数及び大腸菌数の実態、測定方法や測定機関毎の測定結果のばらつきについて調査をおこなってきた¹⁾²⁾。今後、新たな指標の基準値を検討する際には、これら実態調査に加えて、新たに大腸菌数の基準値を設定した場合に、基準値に応じて衛生学的リスクがどの程度に制御されるのかといったリスク評価の観点を踏まえた基準値設定の考え方について整理を行う必要がある。また、下水処理水の再利用が国内外で進められており、ISO/TC282においても国際規格が検討されていることを踏まえ、再生水利用のリスク及び性能評価についての検討が求められている。

そこで本研究では、平成 26 年度に再生水利用の実態に関するアンケートを実施し、導入されている再生処理方法を用途別に整理した。また、それぞれの再生処理方法における病原微生物の除去率について文献値等をもとに整理した。平成 27 年度は、病原微生物であるノロウイルスに着目し、衛生学的リスク、コスト、電力消費量の観点から再生水利用における適切な処理方法を検討した。また、下水処理場の塩素消毒施設において、塩素消毒による大腸菌群及び大腸菌の除去特性を把握するため、運転条件（滞留時間、塩素注入率）の確認、実施設における大腸菌と大腸菌群の除去効果の確認を行った。さらに平成 28 年度は、下水道の放流水におけるノロウイルス対策について検討するため、放流水利用における年間感染確率（衛生学的リスク値）に応じたウイルス除去率の試算、設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定、フロー毎のコスト・電力消費量の試算を行った。

これらの調査結果を踏まえ、再生水および放流水の衛生学的リスク制御に必要な水処理方法、それに係るコストや電力消費量について把握し、適切な消毒方法の検討手法を提示した。

2. 研究内容

(1) 塩素消毒施設の運転条件による大腸菌と大腸菌群の除去効果の把握

塩素消毒による大腸菌群及び大腸菌の除去特性を把握するため、下水処理場の塩素消毒施設において、運転条件（滞留時間、塩素注入率）の確認、実施設における大腸菌と大腸菌群の除去効果の確認を行った。また、大腸菌群の菌種を踏まえた消毒効果を調査した。ビーカー試験では、塩素注入率の変化による大腸菌と大腸菌群の除去効果について確認を行った。

詳細については平成 27 年度下水道関係調査研究報告書³⁾及び第 53 回下水道研究発表会講演

集 4)にて報告しているため、ここでは調査の概要を述べる。

1) 調査方法

平成 27 年 11 月より平成 28 年 1 月にかけて、4 つの下水処理場 A～D（水処理：標準活性汚泥法）で 5 回の塩素消毒施設調査（A 処理場 2 回）を行った。

現地塩素消毒実験の運転条件を確認するため、各処理場で用いている次亜塩素酸ナトリウム溶液の有効塩素濃度と塩素消毒施設の滞留時間の確認を行った。塩素消毒施設の滞留時間は有効容積を流量で除することで算出した。有効容積は竣工図書等の諸元値と調査時の水深より算出した。流量は塩素混和池断面積に流速を乗ずることで算出した。流速は電磁流速計を用いて計測した。

大腸菌群中の大腸菌や、その他の菌種の存在割合の確認のため、IMViC 試験を行った。

塩素消毒実験は処理水（消毒前）を用いて、現地の処理状況を模擬した現地実験及び塩素注入率を変化させた現地外実験を実施し、残留塩素、大腸菌数および大腸菌群数の測定を行った。現地実験は、現地運転条件に合わせて、現地の次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加し、手動にて穏やかに攪拌した。攪拌時間は各処理場の滞留時間となるように調整した。

現地外試験は、A1、B、C 処理場は塩素濃度が 1.0、2.0、3.3、5.3mg/L、A2、D 処理場は塩素濃度が 0.2、0.5、0.8、2.0mg/L となるように次亜塩素酸ナトリウムを添加した（A1 処理場と A2 処理場は同一の A 処理場）。攪拌は手動にて穏やかに 15 分間行った。

2) 調査結果

処理水中の大腸菌群数は 75～1,700CFU/ml であり、放流水基準の 3,000 個/cm³ 以下を満たしていた。除去率については、大腸菌群数（デソキシコール酸塩培地平板培養法）は 53～95%、大腸菌はクロモアガーECC 培地平板培養法で 48～99%、コリラート QT トレー最確数法で 30～84%であった。各塩素消毒施設の運転条件（滞留時間と塩素注入率の積 CT 値）と大腸菌・大腸菌群の除去率との間で単純な関係性は見出せなかった。

図-2.1 は、塩素消毒実験（ビーカー試験）による大腸菌の対数生存率であるが、処理場毎に対数生存率にばらつきが見られた。大腸菌・大腸菌群の菌叢割合についても下水処理場や調査日によって、異なっていた（図-2.2）。大腸菌の菌株毎に、塩素消毒の効果が異なることが報告されている。

大腸菌群・大腸菌の塩素消毒による除去特性にばらつきが見られた一つの要因として、菌種の違いが除去効果に影響を与えていると示唆された。

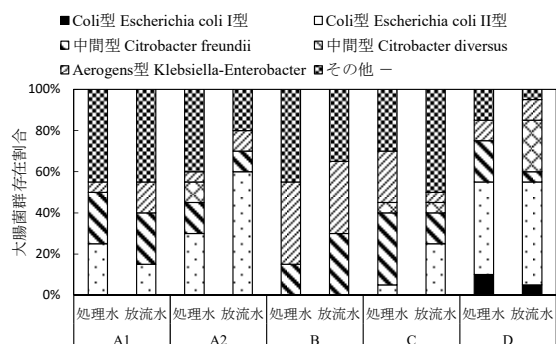
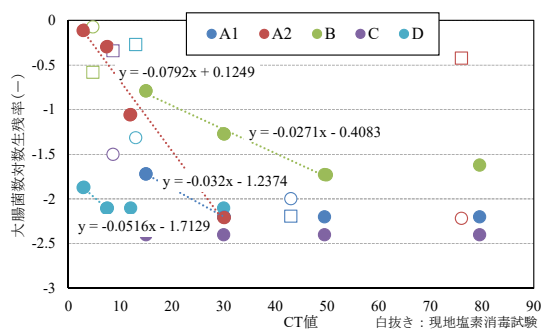


図-2.1 塩素消毒実験における大腸菌の対数生存率 図-2.2 大腸菌群中の大腸菌等の存在割合

(2) 再生水利用における衛生学的リスク評価および処理技術のコスト・エネルギー消費に関する検討

再生水利用3ケース（水洗トイレ用水利用，修景用水利用，親水用水利用）を対象に、許容される年間感染確率（衛生学的リスク値）として 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 人 $^{-1}$ ・年 $^{-1}$ の3段階設定し、それぞれの達成にあたり必要となるノロウイルス除去率を求めた。また、所定の年間感染確率を満たすために必要な再利用用途毎の除去率を満たす処理・消毒フローを選定し、コスト・電力消費量を試算した。

詳細については平成26年度下水道関係調査研究報告書⁵⁾、平成27年度下水道関係調査研究報告書³⁾及び第53回下水道研究発表会講演集⁶⁾にて報告しているため、ここでは調査の概要を述べる。

1) 調査方法

年間感染確率の試算は、板倉ら（2016）⁷⁾の方法にならった。感染確率分布の計算はモンテカルロ法により10,000回行い、年間感染確率の代表値は上位5.0%とした。再生水処理法は、下水道統計（平成24年度版）や自治体での実態を踏まえて設定した。コスト試算は、国交省・国総研が過去に作成した費用関数を用いた。

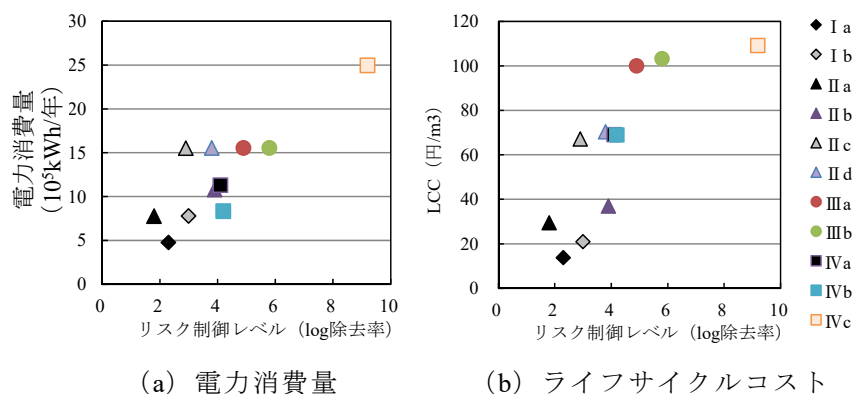
2) 調査結果

再生水利用において1回あたりの摂取水量が大きく曝露頻度も高い親水用水利用で最も高いノロウイルス除去率が求められた（表-2.1）。急速ろ過等の処理プロセスと組み合わせることで、低い消毒強度においても除去率を達成することが出来た。また、より高い除去率を得るためには、オゾン処理プロセスや膜処理プロセスを採用することが効果的であることが分かった。リスク制御レベルと電力消費量、リスク制御レベルとライフサイクルコストの関係を図-2.3に

表-2.1 所定の年間感染確率を満たすために必要な二次処理後のノロウイルス対数除去率*

用途	年間感染確率 (人 $^{-1}$ ・年 $^{-1}$)		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
水洗トイレ用水	0.0	0.7	1.7
修景用水	0.0	0.5	1.5
親水用水	0.3	1.3	2.3

*対数除去率 (log)
 対数除去率 = log(処理前濃度) - log(処理後濃度)
 例：除去率99.00%：対数除去率2.0log
 除去率99.900%：対数除去率3.0log



- I a：塩素消毒（強）、b：紫外線消毒
- II a：急速ろ過＋塩素消毒（弱）
- b：急速ろ過＋紫外線消毒
- c：急速ろ過＋オゾン消毒
- d：急速ろ過＋オゾン処理法＋塩素消毒（弱）
- III a：凝集沈殿＋急速ろ過＋オゾン処理法
- b：凝集沈殿＋オゾン処理法＋急速ろ過＋塩素消毒（弱）
- IV a：急速ろ過＋MF膜＋塩素消毒（弱）
- b：凝集剤添加＋MF膜＋塩素消毒（弱）
- c：急速ろ過＋MF膜＋RO膜

図-2.3 再生水利用におけるリスク制御レベルと電力消費量・ライフサイクルコスト

示す。リスク制御レベルが上がるにつれて、一般的傾向としてライフサイクルコストおよび電力消費量が大きくなる傾向が見られた。オゾン処理・消毒を含むプロセスでは電力消費量が変化しなかったが、これは薬品製造にかかる電力量を考慮していないためと考える。

(3) 下水処理・消毒における衛生学的リスク評価および処理技術のコスト・エネルギー消費に関する検討

放流先での水利用 2 ケース（水浴（全身浴）利用、水道利用）を対象に、年間感染確率（衛生学的リスク値） 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 人 \cdot 年 $^{-1}$ に相当するノロウイルス除去率を試算した。また、所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理技術毎のコスト・電力消費量を試算した。

1) 調査方法

(a) 年間感染確率に応じたウイルス除去率の試算

処理場流入水中の病原微生物濃度の推定には、「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」で調査された国内 18 ヶ所の下水処理場流入水中のノロウイルス GII の濃度データを用いた。流行期を 11 月～3 月、非流行期を 4 月～10 月と設定した。処理場流入水濃度は、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⁷⁾。以上より、流入下水中のノロウイルス濃度の幾何平均 μ は、流行期において 7.83×10^5 copies/L、非流行期において 1.28×10^4 copies/L と算出された。

下水処理水放流水利用における水利用用途は、水浴（全身浴）利用、水道利用の 2 ケースとした。各利用用途における曝露頻度および摂取量は、表-2.2 の通り設定した。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た。

衛生学的リスク値の試算は、モンテカルロ法と式(1)に示す用量反応モデルを用いた。

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

ここで、P は 1 回曝露したときの感染確率、D は用量（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。

年間感染確率の計算は、10,000 回繰り返し、上位 2.5% を代表値とした。放流先水利用点までの希釈倍率は 10 倍とした。水道利用について、浄水処理におけるノロウイルス除去率は $3.2 \log^9$ とした。

(b) 設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定

所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理・消毒フローを選定した。処理方法は、水処理+砂ろ過等の付加プロセス+消毒の組み合わせ処理とした。水処理は、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、付加プロセスは凝集剤添加・砂ろ過とした。消毒は塩素消毒・紫外線消毒・オゾン消毒の 3 ケースとした。

水処理および付加プロセスにおけるノロウイルス除去率は文献値より設定した（表-2.3）。反応タンク滞留時間の長い OD 法は、標準法よりも除去率が高いことがわかる。

表-2.2 放流水利用用途別の曝露頻度・摂取水量^{10)、11)}

接触形態	被曝露者	曝露形態	曝露頻度	摂取水量
水浴（全身浴）利用 ¹⁰⁾	水浴者	水浴中の誤飲	8 回/年	30mL/回
水道利用 ¹¹⁾	水道利用者	水道水の飲用利用	365 日/年	1000mL/日

表-2.3 水処理におけるノロウイルス除去効果の設定

処理法	除去率	運転条件
標準活性汚泥法 ¹²⁾	2.59 log (99.74%)	
オキシデーションディッチ法 ¹²⁾	2.82 log (99.85%)	
嫌気無酸素好気法 ¹²⁾	2.60 log (99.75%)	
凝集剤添加 ¹³⁾	0.50 log (68.37%)	注入率：3mg-Al/L
砂ろ過 ¹²⁾	0.20 log (36.90%)	ろ過速度：300m/日

表-2.4 所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理・消毒におけるノロウイルス対数除去率

用途	年間感染確率		
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
水浴（全身浴）利用	1.63	2.65	3.66
水道利用	2.32	3.32	4.32

※水浴利用は非流行期のみの水利用であるため流行期の除去は不要

(c) フロー毎のコスト・電力消費量

コスト試算にあたって、水処理施設については流総指針¹⁴⁾に基づき算定した。消毒施設については、塩素消毒は流総指針¹⁴⁾、紫外線消毒及びオゾン消毒は過年度調査結果に基づき算定した。電力消費量は、各水処理方式の容量計算を行い、主要設備の容量を設定した上で、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、標準法およびA2O法は10、50、100千m³/日、OD法は2、5、10千m³/日と設定した。

2) 調査結果

(a) 年間感染確率に応じたウイルス除去率の試算

表-2.4は、年間感染確率10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵を満たすために必要な下水処理・消毒におけるノロウイルス除去率について、放流水利用用途別に算出した結果である。1回当たりの摂取水量が大きく曝露頻度も高い水道利用で高いノロウイルス除去率が必要と算出された。

(b) 設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定

年間感染確率10⁻³まで（必要除去率は水浴利用で1.63log、水道利用で除去率2.32log）は、水処理のみの除去率で目標を達成し、消毒における除去が不要との結果となった。本試算において、水処理のみの除去率で目標を達成し、消毒における除去が不要という結果の場合においても、一般的な消毒の指標である大腸菌群を不活化するため、消毒を行うものとした。塩素消毒へのアンモニア影響を考慮し、標準法では7～9月以外は硝化が進行せず「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、標準法は7～9月、完全硝化で「同効果あり」と設定した。

表-2.5に水浴利用における年間感染確率10⁻⁴に相当するノロウイルス除去率（2.65log）を達成可能な処理・消毒フローを示す。現実的な施設能力・費用等を踏まえ、消毒施設の運転条件は、設計負荷に対して標準値、中間値（標準値の1.5倍）、最大値（標準値の2倍）とした。年間感染確率10⁻⁵においては、付加プロセスや運転条件の最大値を用いることで達成可能であった。

表-2.5 水浴利用における年間感染確率 10^{-4} に相当する除去率達成可能な処理・消毒フロー

水処理	付加プロセス		消毒方法	除去率
	凝集剤	砂ろ過		
標準法 (log) ^(注4)	○	—	紫外線 (標準) ^(注2)	3.02
	—	—	紫外線 (1.5倍)	2.83
	—	—	オゾン (標準) ^(注3)	4.95
OD法 (log)	—	—	塩素 (標準) ^(注1)	3.72
	—	—	紫外線 (標準)	2.82
	—	—	オゾン (標準)	5.18
A2O法 (log)	—	—	塩素 (標準)	3.50
	—	○	紫外線 (標準)	2.80
	—	—	紫外線 (1.5倍)	2.84
	—	—	オゾン (標準)	4.96

(注1) 塩素消毒 (標準): 接触時間 15分×注入率 3mg/L、(注2) 紫外線消毒 (標準): 照射量 400J/m²

(注3) オゾン消毒 (標準): 接触時間 15分×注入率 10mg/L、(注4) 標準法 7~9月は完全硝化として OD法・A2O法と同様に塩素消毒のノロウイルス除去効果計上 (塩素 (標準) で約 0.9log)

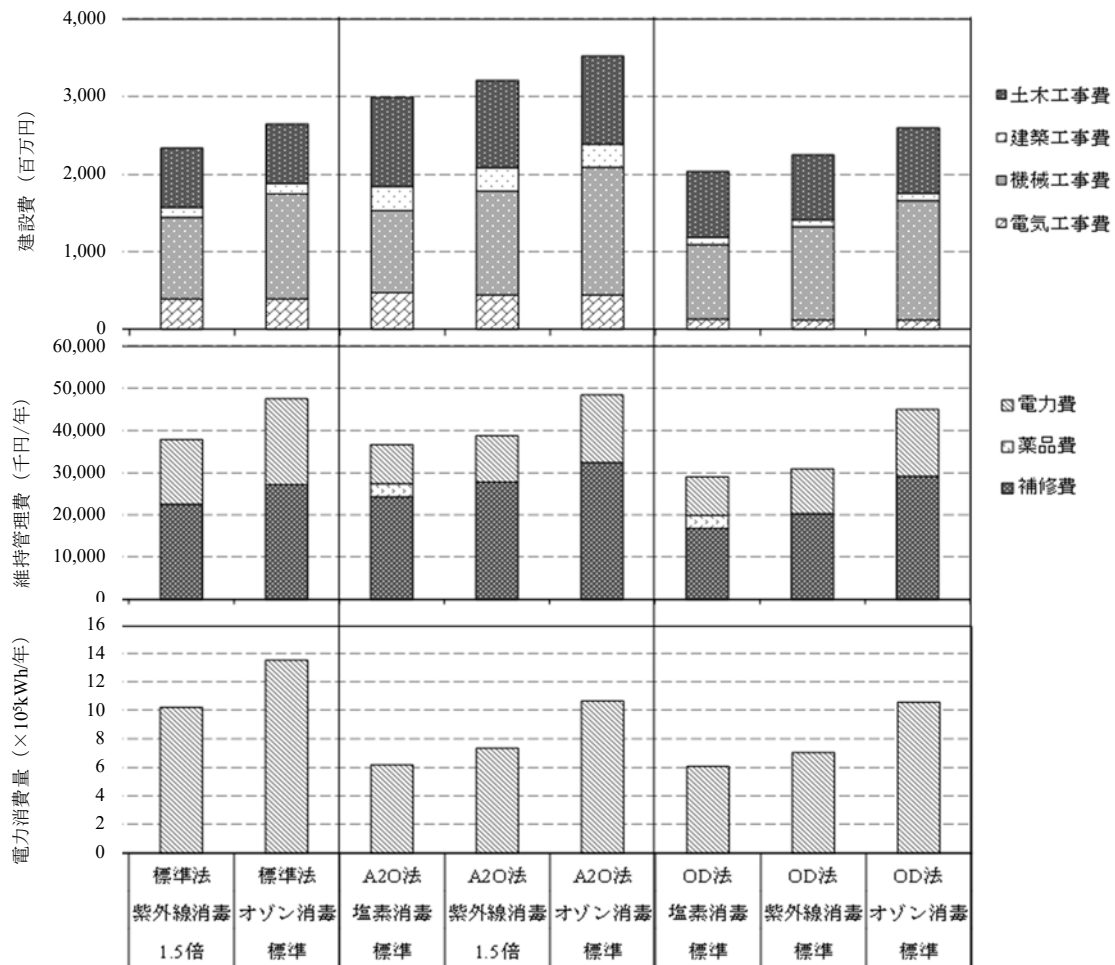


図-2.4 建設費・維持管理費・電力消費量 (日量 10,000 m³)

(水浴利用で年間感染確率 10^{-4} を達成できる処理・消毒方法 (付加プロセス除く))

(c) フロー毎のコスト・電力消費量

試算結果の一例として、図-2.4 に水浴利用において年間感染確率 10^{-4} を達成できる処理・消毒方法（付加プロセス除く）にかかる建設費、維持管理費、電力消費量を、処理水量 10,000m³/日の場合について示した。

本試算により、水処理および消毒を組み合わせた全体での建設費・維持管理費・電力消費量について、処理・消毒の違いの影響や費用の内訳も含めて詳細に把握できた。消毒については、建設費や電力量が塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒の順で高くなる一方、維持管理費は塩素消毒と紫外線消毒で同程度であった。なお、オゾン消毒には脱色・脱臭等の複合的な効果があり、紫外線消毒には消毒剤の残留を回避できるという特徴がある等、技術の特性に応じた多様な効果と費用を総合的に評価して導入検討することが望ましい。

3. まとめ

本研究により、下水処理水における衛生学的指標見直しを踏まえ、再生水および放流水の衛生学的リスク制御に必要な水再生処理方法、それに係るコストやエネルギーについて把握し、適切な消毒方法の検討手法を提示した。

得られた結果は、下水処理場における新たな衛生学的指標導入に向けた基準値の検討や、再生水利用の国際標準化、リスク評価及び再生水利用用途の検討の際の技術的知見として反映する。また、リスク、コスト、エネルギーを考慮した適切な処理消毒方法の選定に関する技術資料として、地方公共団体における活用が期待される。

【参考文献】

- 1) 原田一郎、藤井都弥子、小越眞佐司、對馬育夫：下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討、平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 773 号)、pp.59～66、2014
- 2) 山下洋正、重村浩之、藤井都弥子、小越眞佐司：下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討、平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 823 号)、pp.31-38、2015
- 3) 山下洋正、重村浩之、小越眞佐司、板倉舞、前田光太郎：処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査、平成 27 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 950 号)、pp.37～42、2017
- 4) 前田光太郎、板倉舞、重村浩之、山下洋正：塩素消毒施設の運転条件の違いを踏まえた大腸菌群・大腸菌の除去効果比較、第 53 回下水道研究発表会講演集、pp. 464～466、2016
- 5) 山下洋正、重村浩之、小越眞佐司、川住亮太：処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査、平成 26 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 882 号)、pp.51～54、2016
- 6) 板倉舞、重村浩之、山下洋正：衛生学的リスク評価とコスト・エネルギー消費を踏まえた処理・消毒方法の選定、第 53 回下水道研究発表会講演集、pp. 1019～1021、2016
- 7) 板倉舞、重村浩之、小越眞佐司、南山瑞彦、吉澤正宏、山縣弘樹、山中大輔、山下洋正：再生水利用における衛生学的リスク評価・制御およびコスト・エネルギー消費を考慮処理・消毒プロセスの選定方法、土木学会論文集 G (環境)、Vol.72、No.7、pp.217～226、

2016

- 8) Teunis PF、Moe CL、Liu P、Miller SE、Lindesmith L、Baric RS、Le Pendu J、Calderon RL :
Norwalk Virus:How Infectious is it?、 J. Med. Virol.、 80、 pp.1468～1476、 2008
- 9) 久保田寛顕、小林利男、宮垣融、佐藤親房、尾崎勝：浄水処理工程におけるノロウイルス
の存在状況と除去性、水道協会雑誌、第 78 巻、第 11 号、pp.2～8、2009
- 10) 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、高度処理会議、2001
- 11) 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 (国総研資料 第 654 号)、pp.121～126、2010
- 12) 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、国土交通省、2010
- 13) 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 第 4157 号)、pp.13～29、
2009
- 14) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 参考資料、日本下水道協会、2015