

## 開発途上国における都市排水マネジメントと技術適用に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平成 23～27 年

担当チーム：材料資源研究グループ (リサイクル)

研究担当者：津森ジュン、桜井健介

### 【要旨】

開発途上国における下水処理水の安全なかんがい利用に資するため、開発途上国で重症化の懸念があるノロウイルスを対象に、まず、開発途上国で使われている安定化池やエアレーティッドラグーンの下水処理方法による除去率を測定した。次に、下水処理水のかんがい利用によって栽培されたレタス、玉ねぎ、穀類・芋類の喫食者を対象とし、定量的微生物リスク評価の手法を用いて、一定の健康影響目標を達成するのに必要な除去率を計算し、実際の除去率と比較した。本研究では、健康影響の指標として障害調整生存年数を用い、 $10^6$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>を目標とした。その結果、安定化池の処理水は、加熱調理用の穀類・芋類にはかんがい用水として利用可能であるが、エアレーティッドラグーンの処理水は、適当でなかった。また、安定化池とエアレーティッドラグーンの処理水は共に、生食用のレタスや玉ねぎのかんがいに使うのは適当ではなかった。

キーワード：安定化池、エアレーティッドラグーン、かんがい、ノロウイルス、障害調整生存年数

### 1. はじめに

新興国を中心に、急速な経済成長により工場排水や生活排水の河川、湖沼等への放流に伴い、著しい水質汚濁とそれに伴う利水障害、生態系の破壊など深刻な影響が生じている。また、昨今、人口増加による水資源の逼迫に伴う高度な水の再利用、地球温暖化対策に配慮した下水汚泥等を有効利用した省エネルギー対策が求められつつある。我が国では、こうした状況に対応しうる優れた公害対策の経験や汚水処理、汚泥有効利用技術等を保有しており、海外の多くの開発途上国から支援要請があるものの、開発途上国では気候風土、生活様式、経済状況、水資源の逼迫状況等が異なっており、我が国における下水道に関する考え方や技術がそのまま適用できない場合がある。

本研究は、開発途上国の変化する社会的要請を踏まえ、処理水の各種用途への再利用、下水汚泥等の副産物の有効利用や水・汚泥処理の省エネルギー化などの水・汚泥処理技術やそれらの適用方法の開発を目指すものである。

開発途上国では、やむを得ず下水や下水処理水等をかんがいに利用する場合がある<sup>1)</sup>。下水や下水処理水がかんがい利用される場合には、農作物の喫食者に対し、病原微生物による健康被害が生じる懸念がある。特に、ノロウイルス(NoV)は、開発途上国で乳幼児 109 万人を入院させ、21.8 万人を死亡させていると推測され、開発途上国で重症化する傾向が報告<sup>2)</sup>されており、注目すべき

病原微生物の一つと考えられる。しかし、開発途上国における下水処理水中の病原微生物やかんがい利用時の健康影響に関する情報は乏しく、開発途上国において導入が見られる安定化池(Waste stabilization ponds, WSP)やエアレーティッドラグーン(Aerated lagoons, AL)での、NoV濃度の測定事例は少ない。また、「下水の農業利用に関する WHO ガイドライン」<sup>3)</sup>においても、ロタウイルス(RV)などの病原微生物による健康影響について検討されたが、NoV は対象となっていない。

平成 26 年度は、健康影響の指標として障害調整生存年数(Disability-adjusted life year, DALY)を用い、NoV による健康影響軽減の観点から、WSP や AL の処理水のかんがいへの適切な利用方法を明らかにするため、まず、実際の WSP や AL の NoV 除去率を求めた。次に、農作物の喫食者を想定したシナリオについて、定量的微生物リスク評価(Quantitative microbial risk assessment, QMRA)の手法を用いて、健康影響目標値以下を達成可能な NoV 除去率を示した。最後に、それらと比較し、下水処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

## 2. WSP、AL における NoV の除去率

### 2.1 調査方法

下水処理におけるNoV濃度の除去に関する調査は、インドネシア共和国の表1で示した下水処理場で1度ずつ行った。流入水、処理水中のNoV genogroup1, 2 (G1, G2)濃度、浮遊物質を測定し、NoVの除去率(R)と対数除去率(LR)を

表1 対象処理場の処理方法、流入量と平均滞留時間

処理場	処理名称	処理構成	計画流入量(m <sup>3</sup> /日)	流入量(m <sup>3</sup> /日)	平均滞留時間
A	WSP	嫌気性池+好気・嫌気池+熟成池	約 80,000	約 40,000	約 20 日
B	AL	曝気池+沈殿池	約 50,000	約 20,000	約 3 日
C	AL	曝気池+沈殿池	約 20,000	約 10,000	約 2 日

$R = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100$  と  $LR = -\log_{10}(C_{out}/C_{in})$  により求めた。ここで、 $C_{in}$  と  $C_{out}$  は流入水と処理水中のNoV濃度である。また、処理水をガラス繊維ろ紙(GF/B、Whatman)でろ過した試料のNoV濃度も測定した。NoV濃度は、既報<sup>9)</sup>に従い、逆転写定量PCR法で測定した。浮遊物質は、下水試験方法に従い、ガラス繊維ろ紙(GF/B、Whatman)で測定した。

## 2.2 調査結果

各下水処理場のNoV G1とG2濃度、除去率および浮遊物質を表2に示す。WSPを採用したA処理場の除去率は、da Silva<sup>9)</sup>らによるフランスの事例と同等であり、ALを採用したB、C処理場の除去率より高かった。熟成池は、滞留時間の大半を占め、太陽光の働き等で病原微生物を消毒する役割が期待されており、フランスの事例<sup>9)</sup>でも熟成池においてNoVの高い除去率が報告されている。本調査においても、WSP中の熟成池が機能し、高い除去率を示したと考えられる。ただし、逆転写定量PCR法では、不活化されたNoVも検出される場合があり、実際に感染価を有するNoVの除去率は、本調査で測定された除去率よりも高い可能性がある。

各処理水をろ過した試料中のNoV濃度は、各処理水のろ過していない試料中のNoV濃度の11.6%~32.0%であり、大半は浮遊物質に付着していると考えられた。また、B処理場の除去率は、同じくALを採用したC処理場の除去率より、高かった。C処理場は、流出した浮遊物質がB処理場より多く、多くのNoVは、浮遊物質に付着したまま流出したものと考えられた。

## 3. ノロウイルスの健康影響評価に基づく WSP および AL 処理水のかんがいへの適切な利用方法の検討

### 3.1 方法

WHOガイドライン<sup>3)</sup>に従う次の手順で、健康影響目標値を耐容感染確率に換算した後、農作物(レタス、玉ねぎ、穀類・芋類)の喫食者を想定したシナリオについて、QMRA手法を用いて、換算耐容感染確率以下が達成されるかんがい水のウイルス濃度と必要除去率を計算した。必要除去率と前章で示された下水処理による実際に測定した除去率を比較して、WSPおよびAL処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

第一に、健康影響目標値を耐容感染確率に換算するため、健康影響目標値を、NoV感染1件あたりのDALYで除して、耐容感染確率を求めた。健康影響目標値は、WHO<sup>3)</sup>が使用している $10^6$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>を用いた。

NoV感染1件あたりのDALYは、処理水のかんがい利用によって生育した農作物によるNoV発症1件あたりのDALY(DB)に、飲料水質ガイドライン<sup>6)</sup>と同様に、感染者あたりの発症確率(0.68<sup>7)</sup>)とNoVに対して感受性を持つ人の割合(0.8<sup>7)</sup>)を乗じて算出した。DBは、開発途上国全体のNoV発症によるDALYの合計の5%を年間発症件数で除して算出した。この5%は、WHOが用いているRV<sup>3)</sup>の値と同等と仮定して用いた。ここで、開発途上国全体とは、米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、日本、イスラエル、欧州33国を除く全世界である。開発途上国全体のNoV発症によるDALYは、乳幼児(5歳未満)の入院と死亡によるDALYとした。乳幼児の入院未満で軽症のDALYと成人の全症状のDALYは、開発途上国全体のNoV発症によるDALYに占める割合は小さいと推測されることから、加味

表2 各下水処理場の NoV G1 と G2 濃度、除去率、対数除去率および浮遊物質

処理場	NoVG1				NoVG2				処理水中の浮遊物質(mg/L)
	流入水 (コピー/L)	処理水 (コピー/L)	除去率 (%)	対数除 去率(-)	流入水 (コピー/L)	処理水 (コピー/L)	除去率 (%)	対数除 去率(-)	
A	$2.7 \times 10^7$	$1.6 \times 10^5$	99.4	2.2	$8.4 \times 10^6$	$6.7 \times 10^4$	99.2	2.1	50
B	$1.4 \times 10^7$	$1.5 \times 10^6$	88.9	1.0	$2.1 \times 10^6$	$2.1 \times 10^5$	89.8	1.0	10
C	$5.1 \times 10^6$	$1.3 \times 10^6$	74.5	0.6	$5.0 \times 10^6$	$1.2 \times 10^6$	76.0	0.6	55

しなかった。乳幼児の入院および死亡によるDALYは、文献<sup>9)</sup>より、入院者数と死亡者数を109万人と21.8万人とし、Havelaarの報告<sup>9)</sup>と同様に、入院者数と死亡者数に、重み(入院; 0.23、死亡; 1)と影響期間(入院; 1週間、死亡; 損失余命80年)をそれぞれ乗じて計算した。開発途上国全体で発生する年間発症件数は、開発途上国人口50.8億人<sup>9)</sup>の0.048件人<sup>-1</sup>である2.44億件とした。この開発途上国人口に占める発症件数の割合は、先進国の値<sup>10)</sup>と同等と仮定した。

第二に、下水処理水のかんがい利用により生育した3種類の農作物(レタス、玉ねぎ、穀類・芋類)の喫食者を想定したシナリオについて、QMRA手法を用いて、換算された耐容感染確率が達成されるかんがい水中のウイルス濃度と必要な除去率を計算した。レタスと玉ねぎは、生食を想定し、WHOガイドライン<sup>3)</sup>と同じ計算条件とした。穀類・芋類は、加熱調理を想定し、処理水付着量10-15mL/100g、喫食量700g/日、喫食頻度365日/年、農地での収穫時減少率 $10^2$ から $10^3$ まで、加熱調理による減少率 $10^6$ から $10^7$ まで<sup>3)</sup>とした。1日あたり感染確率 $P_{inf,d}$ は、Teunisら<sup>11)</sup>の用量-反応モデルに基づき、式(1)で計算した。

$$P_{inf,d} = 1 - {}_2F_1(\alpha, \mu(1-a), \alpha + \beta; (-a)/(1-a)) \quad (1)$$

ここで、 ${}_2F_1$ は超幾何関数、 $\mu$ はNoVの摂取量、 $\alpha=0.04$ 、 $\beta=0.055$ 、 $a=0.0001$ である。既報<sup>11)</sup>では、NoVの凝集の違いを考慮したモデルを提示しているが、残留したNoVの摂取時の凝集に関する判断材料が無いため、既報<sup>7)</sup>と同様に凝集が無い状態を想定している。年間感染確率 $P_{inf,y}$ は、式(2)によって計算した。

$$P_{inf,y} = 1 - (1 - P_{inf,d})^n \quad (2)$$

ここで、 $n$ は年間の喫食頻度である。なお、この計算される確率には、家庭内での2次感染や他の経路(飲料水など)からの感染は含まれていない。

### 3.2 結果

NoVのDBは $3.6 \times 10^3$ 年・件<sup>-1</sup>であり、健康影響目標値 $10^6$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>は、耐容感染確率 $5.1 \times 10^4$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>に換算された。RVのDB<sup>3)</sup>と比較して、NoVのDBは低かった。しかし、感染者あたりの発症確率とNoVに対して感受性を持つ人の割合は高いため、最終的に、NoVの耐容感染確率は、RVの耐容感染確率( $7.7 \times 10^4$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>)より、わずかに低かった。

レタス、玉ねぎ、穀類・芋類へのかんがい利用で、耐容感染確率 $5.1 \times 10^4$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>を達成するNoV濃度は、それぞれ、 $9.7 \times 10^1$ 、 $3.7 \times 10^1$ 、 $2.8 \times 10^5$ コピー/Lであった。かんがい水のNoV濃度を、前章で測定した流入水のNoV

G1とG2の濃度の合計の中央値の $1.6 \times 10^7$ コピー/Lと仮定すると、レタス、玉ねぎ、穀類・芋類へのかんがい利用で、必要な除去率は、それぞれ、99.999994%(LR:7.2)、99.9998%(LR:5.6)、98.4%(LR:1.8)であった。

必要な除去率と下水処理による除去率の比較から、WSPの処理水は、加熱調理用の穀類・芋類には利用可能であるが、ALの処理水は、適当でなかった。また、WSPとAL処理水は、生食用のレタスや玉ねぎのかんがいには使うのは適当でなく、水処理方法の改善や消毒設備の付加が必要であると考えられた。

### 4. まとめ

本報で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 下水処理場のNoVの実態を調査したところ、WSPの処理場のNoV除去率は、ALの処理場の除去率より高かった。
- 2) NoVのDBは $3.6 \times 10^3$ 年・件<sup>-1</sup>であり、健康影響目標値 $10^6$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>は、耐容感染確率 $5.1 \times 10^4$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>に換算された。
- 3) 農作物の喫食者を想定したシナリオについて、健康影響目標値を $10^6$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>(耐容感染確率 $5.1 \times 10^4$ 人<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>)とした場合、流入水のNoV濃度を $1.6 \times 10^7$ コピー/Lと仮定すると、生食用のレタス、玉ねぎ、加熱調理用の穀類・芋類へのかんがい利用で、必要な除去率は、それぞれ、99.999994%(LR:7.2)、99.9998%(LR:5.6)、98.4%(LR:1.8)であった。WSPの処理水は、穀類・芋類にはかんがい用水として利用可能であったが、ALの処理水は、適当ではなかった。また、WSPとAL処理水は、レタスや玉ねぎに使うのは適当ではなかった。

### 参考文献

- 1) Takashi Asano, Franklin Burton, Harold Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous, 2007. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. 61, McGraw-hill New York, USA.
- 2) Patel, M. M., Widdowson, M. A., Glass, R. I., Akazawa, K., Vinjé, J., Parashar, U. D., 2008. Systematic literature review of role of noroviruses in sporadic gastroenteritis. *Emerging infectious diseases*, 14(8), pp.1224-31.
- 3) World Health Organization, 2006. *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. WHO Press, Switzerland.
- 4) 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, *下水道協会雑誌*, 46(512), pp.91-101.
- 5) da Silva, A. K., Le Guyader, F. S., Le Saux, J.-C.,

- Pommepuy, M., Montgomery, M. A., & Elimelech, M. (2008). Norovirus removal and particle association in a waste stabilization pond. *Environmental Science and Technology*, 42(24), pp.9151-9157.
- 6) World Health Organization, 2011. *Guidelines for drinking-water quality* – 4th ed., pp.131-133, WHO Press, Switzerland.
  - 7) Schoen, M.E., Ashbolt, N.J., 2010. Assessing pathogen risk to swimmers at non-sewage impacted recreational beaches. *Environmental Science and Technology*, 44 (7), pp. 2286-2291.
  - 8) Havelaar A. H., Melse J. M., 2003. *Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality: a burden of disease approach*. RIVM report 734301022.
  - 9) The United Nations Children’s Fund, 2005. *The state of the world’s children 2005*, UNICEF House, New York, USA.
  - 10) Kemmeren, J.M., Mangen, M.-J.J., van Duynhoven, Y.T.H.P., Havelaar, A.H., 2006. *Priority setting of foodborne pathogens -Disease burden and costs of selected enteric pathogens*. RIVM report 330080001/2006.
  - 11) Teunis, Peter F. M., Moe, Christine L., Liu, Pengbo, E. Miller, Sara, Lindesmith, Lisa, Baric, Ralph S., Le Pendu, Jacques, Calderon, Rebecca L., 2008. Norwalk virus: How infectious is it?, *Journal of Medical Virology*, 80(8), pp. 1468-1476.

## A STUDY ON URBAN WASTEWATER MANAGEMENT AND THE APPLICATION OF TECHNOLOGY IN DEVELOPING COUNTRIES

**Budgeted** : Grants for operating expenses

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Recycling Research Team, Materials and Resources Research Group

**Author** : TSUMORI Jun, SAKURAI Kensuke

**Abstract** : In order to show the safe use of treated wastewater for crop irrigation, the norovirus removal ratios by waste stabilization ponds and aerated lagoons were measured, and, treatment methods applicable to crop irrigation were evaluated by using a quantitative microbial risk assessment technique. As a result, waste stabilization ponds and aerated lagoons satisfied  $10^{-6}$  DALY person<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> by consumption of irrigated grain and potatoes. On the other hand, waste stabilization ponds and aerated lagoons did not satisfy  $10^{-6}$  DALY person<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> by consumption of irrigated grain and potatoes. Waste stabilization ponds and aerated lagoons did not satisfy  $10^{-6}$  DALY person<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> by consumption of irrigated lettuce and onions.

**Key words** : Waste stabilization ponds, Aerated lagoons, Irrigation, Norovirus, Disability-adjusted life year