

# 単独処理浄化槽を使用する家庭汚水を処理する 2 段式家庭用 人工湿地の処理特性

## Treating Performance of Tandoku-Shori Joukasou Effluent and Gray Water with Two Stage of Single Family Constructed Wetland

矢野 篤男\*, 中山 正与\*\*, 山田 一裕\*\*\*, 小浜 暁子\*, 江成敬次郎\*, 松浦 豊\*\*\*\*  
Tokuo Yano\*, Masatomo Nakayama\*\*, Kazuhiro Yamada\*\*\*, Akiko Kohama\*, Keijiro Enari\* and Yutaka  
Matsuura\*\*\*\*

### Abstract

In this study, the treating performance with the two stage of constructed wetland in the treatment of the effluent of tandoku-shori johkasou and the gray water was estimated and the possibility of the advanced treatment of domestic wastewater with the constructed wetland was examined. The obtained results were as follows. The average removal efficiency of BOD was  $92.2 \pm 8.0\%$  throughout the experiment, and those of COD, TN and  $\text{NH}_4\text{-N}$  were  $69.4 \pm 6.9$ ,  $65.9 \pm 19.3$  and  $77.7 \pm 17.7\%$ , respectively. Stable processing efficiencies were achieved in BOD, COD, TN and  $\text{NH}_4\text{-N}$ . The treating efficiencies of the second stage of the constructed wetland were higher than those of the first stage of constructed wetland. Although TN removal efficiency in the first stage of vertical flow constructed wetland was low in the former period, the change of the vertical flow constructed wetland to the hybrid constructed wetland in the first stage of the constructed wetland the latter period greatly improved the treatment efficiency of TN. It was shown that the application of the constructed wetland as the advanced treatment of Tandoku-shori johkasou was sufficiently possible.

### 1. はじめに

2019 年におけるわが国の汚水処理施設の処理人口は、1 億 1,636 万人となり、汚水処理人口普及率は 91.7% となった<sup>1)</sup>。わが国の下水道は人口が増加することを前提に、集合処理方式で整備が進められてきた。しかし、わが国の総人口は、2015 年国勢調査による 1 億 2,709 万人から 2065 年には 8,808 万人と推計されている<sup>2)</sup>。わが国の少子高齢化ならびに地方の人口減少が加速度的に進む中で、地方では利用者の減少と施設の老朽化という二つの問題を抱え、これらに対する支援が地方自治体の財政を圧迫してい

る。これまでわが国では、下水道設置の費用対効果が低い地域における下水処理を補完するための個別分散型処理設備として浄化槽が導入され、普及が進められてきた。特に、中山間地域や集合処理区域周辺部において一人当たりの整備費が小さい個別処理すなわち浄化槽の活用が望まれている。浄化槽はし尿と雑排水を処理する個別分散型の汚水処理施設であるが、単独処理浄化槽はし尿のみの処理を行う。平成 12 年の浄化槽法改正により単独処理浄化槽の新設は原則禁止されたが、現在も多くの単独処理浄化槽が使用されている。2016 年時点で全浄化槽設置基 760 万基のうち単独処理浄化槽は約 400 万基 (52.6%) となっており<sup>3)</sup>、単独処理浄化槽の使用は公共用水域の水質悪化の要因となっている。欧米諸国をはじめ海外の多くの国では人口密度が低い農村地域における排水処理として人工湿地が用いられている。人工湿地による汚水

2021 年 9 月 24 日受理

\* 環境応用化学科 客員研究員  
\*\* 都市マネジメント学科 教授  
\*\*\* 環境応用化学科 教授  
\*\*\*\* 工学研究科土木工学専攻

処理法は設置費用が安く、維持管理が容易であり効率的に汚水を処理できる技術であるとして広く知られている<sup>4)</sup>。人工湿地は自然湿地の浄化メカニズムを人工的に高めた水質浄化システムであり、このような人工湿地を用いて生活排水、農業排水、工場排水および道路排水などいろいろなタイプの排水処理が世界中で行なわれている<sup>5)</sup>。2006年までにドイツでは5,500を超える人工湿地が普及し、次いでオーストリアが1,400そしてイギリス、イタリアの1,000、さらにフランスの400、デンマークの200、ポルトガルの120の人工湿地が運転している。アメリカでは1980年代半ばまでは約400の自然湿地と人工湿地が生活排水や工場排水、農地流出水などの処理に利用され、湿地のタイプとしては表面流れ方式が最も多かった。しかし、1990年代から伏流式人工湿地が急速に増え、現在、約8,000が運転中と言われている。この他、スイス、エストニア、ポーランド、ノルウェーなどでも多くの人工湿地が運転中であり<sup>6,7)</sup>、ヨーロッパおよび北米での人工湿地の数は6万を超えるともいわれている<sup>8-10)</sup>。ヨーロッパの国々における人工湿地は主に生活排水処理に適用されており、生活排水処理のためのガイドラインも作成されている<sup>11)</sup>。イギリスでは2007年時点で1,005の人工湿地のうち875ヶ所、人工湿地設置個所の87%の人工湿地が生活排水の処理に用いられている<sup>12)</sup>。

近年、わが国において人工湿地による汚水処理に関心が高まってきており、北海道・東北を中心に主に畜産排水処理のための多くの人工湿地が設置されてきた<sup>13)</sup>。しかし生活排水を対象とした人工湿地の事例は少なく、中野等により下水処理、生活排水処理の報告がなされている<sup>14,15)</sup>。これまで筆者らは単独処理浄化槽を使用している家庭の浄化槽放流水ならびに台所排水や浴室排水などの雑排水の高度処理を目指し、家庭用人工湿地の処理性能を検討してきた。本研究では単独処理浄化槽を使用している家庭汚水を処理する2段式ハイブリッド型家庭用人工湿地の4年間の処理特性について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 人工湿地概要

人工湿地設置場所は仙台市内の住宅団地で単独処理浄化槽を使用している家庭であった。人工湿地は2段式人工湿地とし、人工湿地のサイ

ズは1段目では[長さ2m×幅2m×深さ0.7m]、2段目は[長さ2m×幅1m×深さ0.7m]であった。人工湿地システムは2016年10月～2019年3月まで1段目は鉛直流、2段目は鉛直流-水平流のハイブリッド人工湿地とした。TNの処理効率を上げるために2019年4月～2021年3月までは1段目、2段目ともに鉛直流-水平流のハイブリッド型とした。人工湿地は表面から55cmの深さまでを鉛直流とし、底面から15cmを水平流とした。

人工湿地内にはろ材として礫(径:5～20mm, 20～50mm)を用い、人工湿地植物として景観に配慮してツツジを植栽した。採水箇所は流入水、1段目からの流出水、2段目からの流出水の計3ヶ所とした。人工湿地への流入水として単独処理浄化槽からの放流水と台所排水・風呂排水などの家庭雑排水と家屋の屋根の一部からの雨水が貯留槽に流れ込み、貯留槽の水位が一定の高さになった時に水中ポンプが作動し、人工湿地へ流入する。植栽植物は人工湿地が個人の庭に設置することから景観に配慮しツツジとした。

処理対象人数は2016年10月～2019年3月までは4名、2019年4月～2021年3月までは3名であった。実験期間は2016年10月～2021年3月であった。実験期間を2016年10月～2019年3月までを前期、2019年4月～2021年3月までを後期とした。

写真1に家庭用人工湿地の全容を示し、図1に鉛直流人工湿地とハイブリッド型人工湿地の模式図を示す。人工湿地は5月にはツツジが満開となる。



写真1 家庭用人工湿地の全景

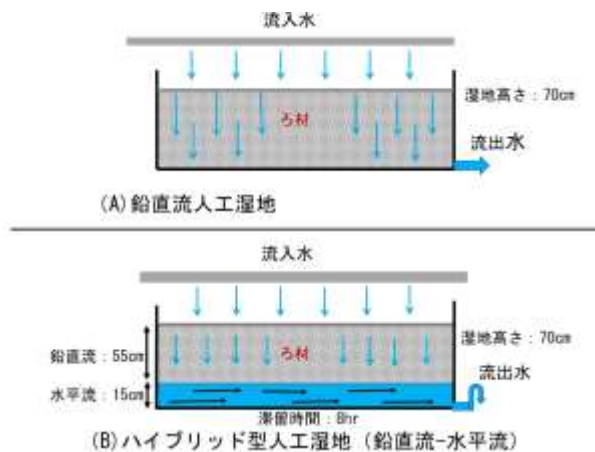


図1 鉛直流人工湿地とハイブリッド型人工湿地の模式図

### 2.2 測定方法・測定項目

測定項目は pH, EC, BOD, COD, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TN, TP, とし, BOD は 2019 年 4 月から測定を行った。流入水量は貯留槽内の水位データを使用して求めた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 人工湿地への流入水量

図2に2016年10月1日～2021年3月31日までの降雨量と流入水量の変化を示す。本人工湿地には人工湿地を設置している居宅の屋根の一部からの雨水が家庭雑排水と一緒に貯留槽に流入することから、降雨量が多い日は人工湿地への流入水量が多いことが分かる。表1に前期, 後期, 実験の全期間における平均の日流入水量, 日最大流入水量, 日最小流入水量を示す。表より前期における1日の平均流入水量は498 ± 273L, 後期では361 ± 299Lであった。前期の流入水量は後期より1日当たり130L程度多くなっていた。これは前期では家族構成人数が4名だったのが, 後期では3名に減少したことによるものと思われる。また, 2016年10月～2021年3月までの全期間の平均流入水量は436 ± 293Lであった。1日当たりの最大流入水量は2,756L, 最小流入水量は34.5Lであった。本研究の対象とした家庭における人工湿地では流入負荷変動は非常に大きいものであった。

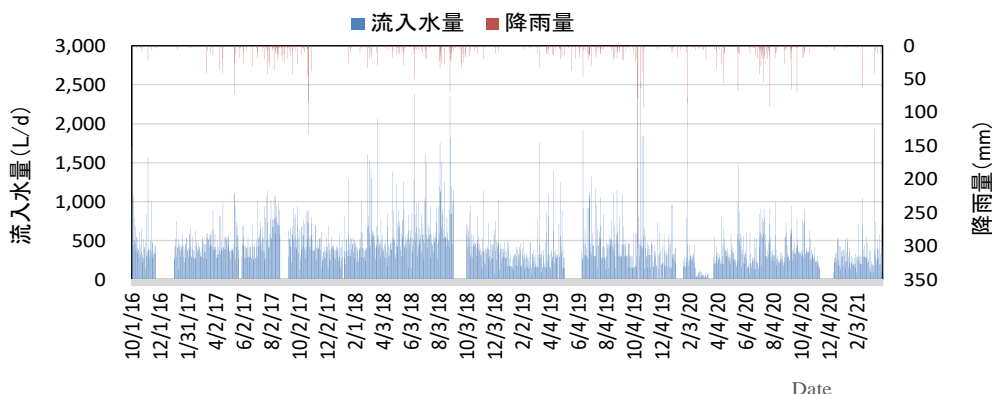


図2 人工湿地への流入水量と降雨量

表1 人工湿地の平均流入水量および日最大・日最小流入水量

期間	単位	日流入水量	日最大流入水量	日最小流入水量
前期	L/d	498 ± 273	2,384	58.9
後期	L/d	361 ± 299	2,756	34.5
全期間	L/d	436 ± 293	2,756	34.5

#### 3.2 全期間の処理効率

図3に2016年10月から2021年3月までの4年半のCOD, TN, NH<sub>4</sub>-Nの流入水, 流出水の平均濃度と平均除去率を示し, BODは2019年4月から2021年3月までの平均濃度および平均除去率を示す。表2には実験期間中の平均の流入水濃度, 流出水濃度および除去率を示す。実験期間中, BODの流入水の最大濃度は137.0 mg/L, 最小濃度は12.3 mg/Lで, 平均の流入水濃度は66.5

± 32.0 mg/Lであった。一方, 流出水では最大濃度32.6 mg/L, 最小濃度は0.5 mg/Lで平均流出水濃度は5.2 ± 6.7 mg/Lであった。BODの平均除去率は92.2 ± 8.0%となり, BODの流入負荷変動は非常に大きかったが, 実験期間中を通じて安定した処理効率を示した。CODの流入水の最大濃度は130.2 mg/L, 最小濃度は10.7 mg/L, 平均の流入水濃度は55.7 ± 27.5 mg/Lであった。一方, 流出水では最大濃度50.3 mg/L, 最小濃度

は 1.4 mg/L で平均流出水濃度は 16.0 ± 9.4 mg/L となり、平均除去率は 71.3 ± 6.9%であった。同様に TN の流入水の最大濃度および最小濃度はそれぞれ 64.9 mg/L, 3.0 mg/L, 平均流入水濃度は 18.9 ± 11.4 mg/L であった。流出水の最大濃度および最小濃度はそれぞれ 30.2 mg/L, 1.0 mg/L, 平均流出水濃度は 6.0 ± 6.2 mg/L となり、平均除去率は 68.0 ± 18.4%であった。NH<sub>4</sub>-N の流入水の最大濃度および最小濃度はそれぞれ 41.3 mg/L, 0.2 mg/L, 平均流入水濃度は 8.9 ± 8.4 mg/L であった。流出水の最大濃度および最小濃度はそれぞれ 10.0 mg/L, 0.0 mg/L,

平均流出水濃度は 1.9 ± 2.0 mg/L となり、平均除去率は 78.3 ± 17.7%であった。実験期間中、BOD, COD, TN, NH<sub>4</sub>-N の流入負荷変動は大きいものの、実験期間を通じて安定した処理効率を示した。図 3-(D) で 2020 年 11 月 10 日での流入水は 0.2 mg/L と非常に低い値であり、流出水においても 0.2 mg/L であったことから 11 月 10 日では NH<sub>4</sub>-N の除去率は 0%となった。

このように本人工湿地において BOD は浄化槽の放流基準である 20 mg/L をクリアしており、単独処理浄化槽を使用する家庭污水の高度処理もしくは後処理として十分な性能を有していた。

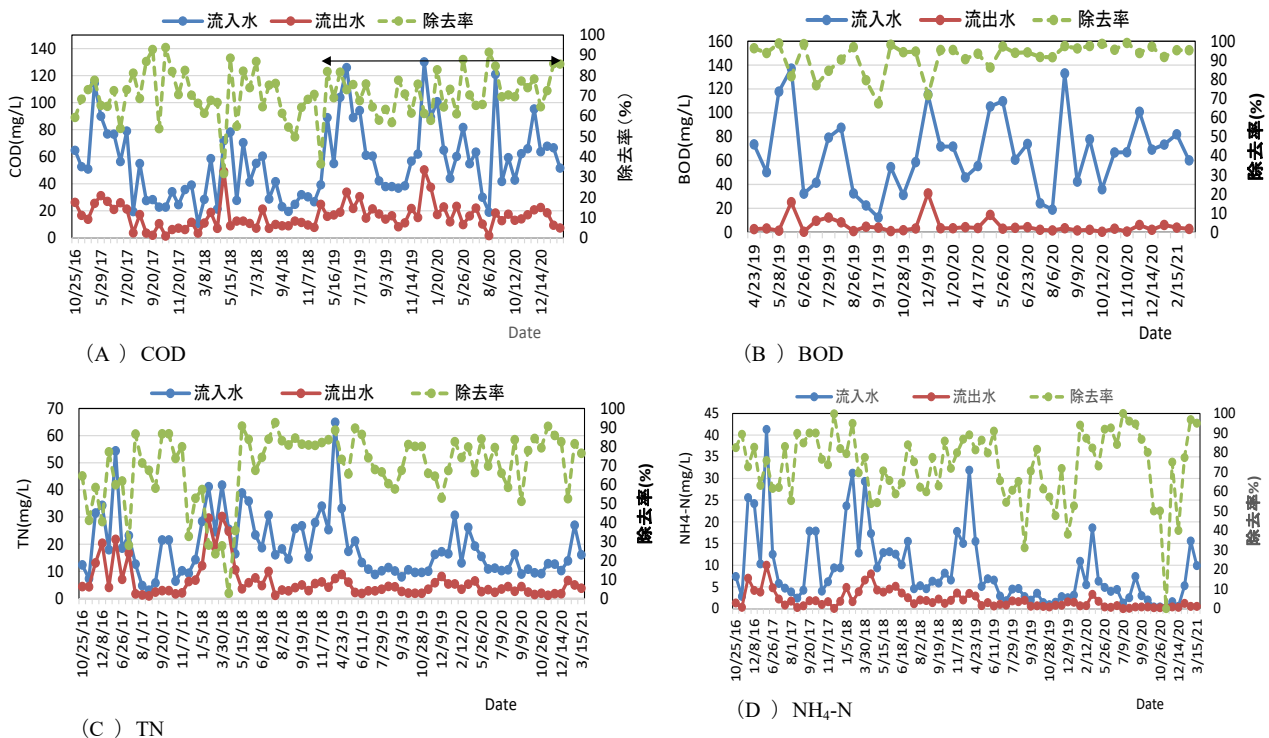


図 3 COD, BOD, TN, NH<sub>4</sub>-N の流入水, 流出水および除去率

表 2 家庭用人工湿地の平均流入濃度, 平均流出濃度および平均除去率

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
流入水	mg/L	66.5 ± 32.0	55.7 ± 27.5	18.9 ± 11.4	8.9 ± 8.4
流出水	mg/L	5.2 ± 6.7	16.0 ± 9.4	6.0 ± 6.2	1.9 ± 2.0
除去率	%	92.2 ± 8.0	71.3 ± 6.9	68.0 ± 18.4	78.3 ± 17.7

### 3.3 1 段目, 2 段目湿地ごとの処理効率

1 段目, 2 段目湿地ごとの処理効率を表 3 に示す。湿地ごとの除去率は以下のように求めた。流入水の濃度を C<sub>0</sub> mg/L, 1 段目湿地の流出水の濃度を C<sub>1</sub> mg/L, 2 段目流出水の濃度を C<sub>2</sub> mg/L, とする。各湿地での除去率は以下のように算出した。

$$1 \text{ 段目湿地除去率} = 100 \times (C_0 - C_1) / C_0 (\%)$$

$$2 \text{ 段目湿地除去率} = 100 \times (C_1 - C_2) / C_1 (\%)$$

$$\text{全体の除去率} = 100 \times (C_0 - C_2) / C_0 (\%)$$



表 3 人工湿地での 1 段目, 2 段目湿地の処理効率

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
1 段目	%	42.9 ± 19.8	32.2 ± 33.3	16.6 ± 25.9	49.2 ± 22.3
2 段目	%	86.3 ± 14.1	57.7 ± 26.3	61.7 ± 16.3	57.4 ± 23.4
湿地全体	%	92.2 ± 8.0	71.3 ± 6.9	68.0 ± 18.4	78.3 ± 17.7

表に示すように 1 段目湿地と 2 段目湿地の処理効率をみると各項目ともに 2 段目湿地では 1 段目湿地より高い処理効率を示した。しかし、NH<sub>4</sub>-N では 1 段目と 2 段目の処理効率に大きな差はなかった。一方、TN では 2 段目の処理効率は 1 段目と比べて非常に高い値を示し、高い窒素除去が達成されていた。2 段目人工湿地で多く

の BOD が除去されていたが、脱窒は促進された。これは植物の根茎から分泌される有機物により脱窒効果が促進されるとされており<sup>16,17)</sup>、2 段目人工湿地には旺盛にツツジが生育を示していることから、2 段目湿地ではこれらのツツジの根茎からの有機物を利用して脱窒が促進され、TN が除去されたものと思われた。

### 3.4 前期および後期の処理効率

図 4 に実験期間を前期、後期に分けた時の COD, TN, NH<sub>4</sub>-N の処理効率を示す。

COD の前期および後期の処理効率はそれぞれ 69.2 ± 13.7, 72.7 ± 9.1%, TN ではそれぞれ 64.5 ± 23.0, 74.0 ± 10.8%, NH<sub>4</sub>-N ではそれぞれ 77.3 ± 12.2, 81.5 ± 22.2% であった。各項目ともに後期が前期より高い処理効率を示し、特に TN でその差が大きく、COD および NH<sub>4</sub>-N では小さい。

人工湿地では一般に時間経過とともに人工湿地内の微生物相が安定し、処理効率が向上することは指摘されている<sup>18)</sup>。本人工湿地においても時間経過に伴い人工湿地の微生物相が安定化し、後期において処理効率が高くなったものと思われた。

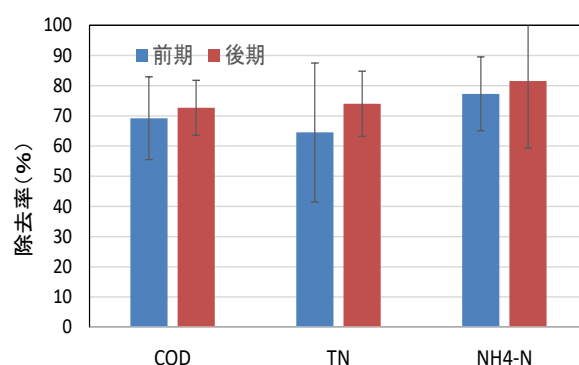


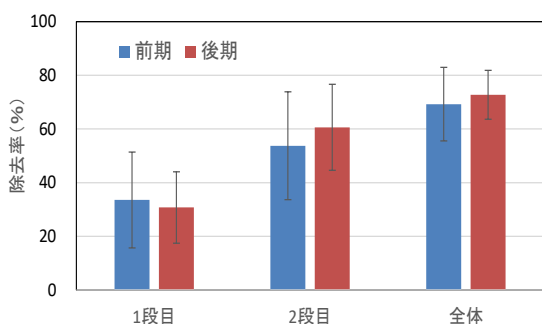
図 4 前期・後期での COD, TN, NH<sub>4</sub>-N の処理効率

### 3.5 前期および後期における 1 段目, 2 段目の処理効率

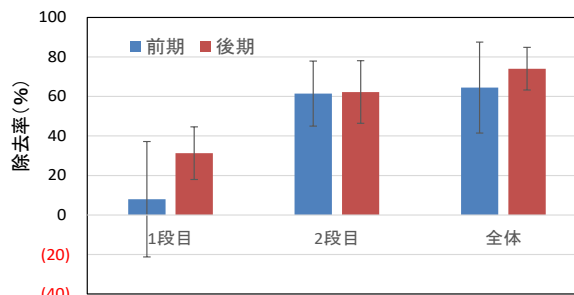
1 段目, 2 段目湿地ごとの処理効率を図 5 に示す。湿地ごとの処理効率は 3.3 と同様に求めた。

図 5-(A) で COD の 1 段目湿地では前期・後期ではほぼ同程度の処理効率を示し、2 段目では後期において前期より高い処理効率を示した。図 5-(B) の TN では 1 段目湿地の処理効率は 2 段目湿地と比べ明らかに低かった。これは前期では 1 段目は鉛直流であったため、還元的な反応であ

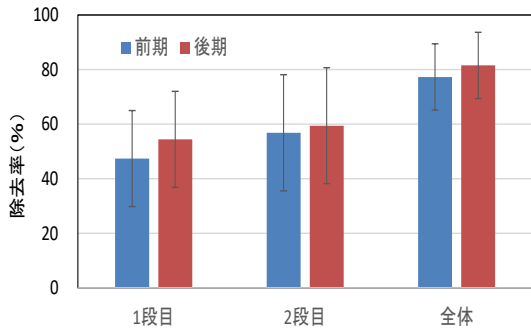
る脱窒が十分に進行しなかった。後期では鉛直流の 1 段目湿地を (鉛直流-水平流) のハイブリッド型としたことにより脱窒が促進し、TN 除去が進んだことによる。また、2 段目では前期・後期ともに TN の処理効率はほぼ同じであった。図 5-(C) の NH<sub>4</sub>-N では 1 段目・2 段目ともに後期における処理効率が高い傾向を示した。後期では 1 段目をハイブリッド型としたが NH<sub>4</sub>-N 除去は鉛直流よりも高い処理効率を示し、ハイブリッド型人工湿地では硝化・脱窒を同時に促進していると思われた。



(A) COD



(B) TN



(C) NH<sub>4</sub>-N

図5 前期・後期における1段目湿地2段目湿地のCOD・TN・NH<sub>4</sub>-Nの処理効率 (A:COD, B:TN, C:NH<sub>4</sub>-N)

### 3.6 除去率と負荷削減率

人工湿地における蒸発散は人工湿地の水収支と処理効率に大きな影響を与える<sup>19)</sup>。人工湿地では高い蒸発散があることから流入水量と流出水量が異なる。そのため汚濁物質の流入水の濃度と流出水の濃度から算出する除去率を用いた評価では正しく処理効率を評価することはできない。そこで水収支から求めた流入負荷量と流出負荷量から求められた負荷削減率により処理効率を評価する必要がある。

汚濁物質の流入水と流出水の濃度から求めた除去率は式(1)にて、ならびに流入負荷量と流出負荷量から求めた負荷削減率は式(2)にて求めた。

$$\text{除去率} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

表4 前期における除去率と負荷削減率

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
流入濃度	mg/L	-	45.2	23.2	12.9
流出濃度	mg/L	-	13.9	8.2	2.9
除去率	%		69.2	64.5	77.3
流入水量	L/d・m <sup>2</sup>	82.9	82.9	82.9	82.9
流出水量	L/d・m <sup>2</sup>	75.5	75.5	75.5	75.5
流入負荷量	g/d・m <sup>2</sup>		3.75	1.92	1.07
流出負荷量	g/d・m <sup>2</sup>		1.05	0.62	0.22
負荷削減率	%		72.0	67.7	79.3

表5 後期における除去率と負荷削減率

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
流入濃度	mg/L	66.5	66.7	14.3	4.7
流出濃度	mg/L	5.2	18.2	3.7	0.9
除去率	%	92.2	72.7	74.0	81.5
流入水量	L/d・m <sup>2</sup>	60.3	60.3	60.3	60.3
流出水量	L/d・m <sup>2</sup>	52.9	52.9	52.9	52.9
流入負荷量	g/d・m <sup>2</sup>	4.01	4.02	0.86	0.28
流出負荷量	g/d・m <sup>2</sup>	0.27	0.96	0.20	0.05
負荷削減率	%	93.1	76.1	77.2	83.5

$C_{in}$  および  $C_{out}$  は流入水と流出水に含まれる汚濁物質の平均濃度

$$\text{負荷削減率} = \frac{(C_{in} \times Q_{in}) - (C_{out} \times Q_{out})}{C_{in} \times Q_{in}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

$Q_{in}$  および  $Q_{out}$  は流入水量および流出水量、

$C_{in} \times Q_{in} = M_{in}$  および  $C_{out} \times Q_{out} = M_{out}$  はそれぞれ流入水および流出水に含まれる汚濁物質の絶対量

人工湿地における蒸発散量の測定には多くの難しい点があり、多くの場合、気象学的なパラメーターを用いたハモン式、ペンマン式などの計算式により蒸発散量が求められている<sup>20)</sup>。矢野らは仙台市郊外に設置した廃棄物処分場浸出水を処理する人工湿地においてヨシの生育の程度およびヨシの植栽の有無での蒸発散量を測定し、さらにハモン式により蒸発散量を求めた<sup>21,22)</sup>。ヨシの生育良好な人工湿地では蒸発散量は7.4mm/d、生育不良な人工湿地では4.2mm/d、ヨシのなしでは3.0mm/d およびハモン式では2.1mm/dであった。ハモン式から求めた蒸発散量は実際の蒸発散量とは異なっており、ハモン式による蒸発散量は実態を反映していないことを明らかにした。本研究における家庭用人工湿地の植栽植物はツツジであるが、本人工湿地における蒸発散量を7.4mm/dとし、この蒸発散量に基づいて表4に前期、表5に後期の各項目の除去率と負荷削減率を示す。

表 4 の前期における COD の除去率は 69.2%、負荷削減率は 72.0% となり負荷削減率が除去率よりも高い値を示した。また、TN ではそれぞれ 64.5% および 67.7% となり、NH<sub>4</sub>-N ではそれぞれ 77.3% および 79.3% となった。このように除去率と負荷削減率では負荷削減率が除去率よりも 2~3% 高い処理効率を示していた。

表 5 の後期における BOD の除去率は 92.2%、負荷削減率は 93.1% となり負荷削減率が除去率よりも 1% ほど高い値を示した。

また、COD ではそれぞれ 72.7% および 76.1% となり、TN ではそれぞれ 74.0% および 77.2% となり、NH<sub>4</sub>-N ではそれぞれ 81.5% および 83.5% であった。前期と同様に除去率と負荷削減率では負荷削減率が除去率よりも 2~3% 高い処理効率を示した。

このように人工湿地における処理効率を評価するに当たり、流入水および流出水の濃度による除去率よりは流入負荷量と流出負荷量から算出した負荷削減率で評価することが適切と思われた。

表 6 に前期、後期の処理量原単位を示す。処理量原単位は流入負荷量から流出負荷量を減じた値である。

表 6 前期・後期における処理量原単位

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
前期	g/d・m <sup>2</sup>	-	2.70	1.30	0.85
後期	g/d・m <sup>2</sup>	3.74	3.06	0.66	0.23

BOD の後期の処理量原単位は 3.74g/d・m<sup>2</sup>、COD では前期・後期ではそれぞれ 2.70 g/d・m<sup>2</sup> および 3.06 g/d・m<sup>2</sup> となり後期が前期より幾分高い値であった。一方、TN ではそれぞれ、1.30 g/d・m<sup>2</sup> および 0.66 g/d・m<sup>2</sup>、NH<sub>4</sub>-N ではそれぞれ、0.85 g/d・m<sup>2</sup> および 0.23g/d・m<sup>2</sup> となり、後期は前期と比べて低い値となった。これは後期において TN および NH<sub>4</sub>-N の流入濃度および流入水量が前期より低いために、流入負荷量が前期より低くなったことによる。

植栽植物としてツツジを用いた人工湿地の事例がないことから本研究では既往研究により求めた良好な生育を示すヨシの蒸発散量を用いて負荷削減率を求めた。しかし、今後さらに正確な負荷削減率を求めるためには本人工湿地において実測により水収支を求め、正確な蒸発散量を求めることが必要である。

#### 4. まとめ

単独処理浄化槽を使用している家庭の浄化槽放流水ならびに台所排水や浴室排水などの雑排水の高度処理を目指し、2 段式ハイブリッド型の家庭用人工湿地の処理性能を検討し以下の結果を得た。実験期間通して BOD の平均除去率は 92.2 ± 8.0% であり、COD、TN、NH<sub>4</sub>-N はそれぞれ 71.3 ± 6.9、68.0 ± 18.4、および 78.3 ± 17.7% であった。各項目ともに安定した処理効率を示した。1 段目湿地と 2 段目湿地の処理効率をみると各項目ともに 2 段目湿地において 1 段目湿地より高い処理効率を示した。1 段目湿地を鉛直流とした前期では 1 段目における TN 除去は低調であったが、(鉛直流-水平流)としたハイブリッド型とした後期では 1 段目湿地における TN 除去は促進された。人工湿地における蒸発散は人工湿地の処理効率に少なからずの影響を与えており、人工湿地における処理効率を評価するに当たり、流入水および流出水の濃度評価による除去率よりは流入負荷量と流出負荷量から算出した負荷削減率で評価することが適切と思われた。

本研究から単独処理浄化槽を使用する家庭汚水の高度処理として人工湿地の適用は十分に可能と思われた。

#### 引用文献

- 1) 国土交通省：令和元年度末の汚水処理人口普及状況について、[https://report/press/mizukokudo13\\_hh\\_000455.html](https://report/press/mizukokudo13_hh_000455.html)
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口（平成 29 年推計）：[http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp\\_zenkoku2017.asp](http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp)
- 3) 環境省：平成 29 年度における浄化槽設置状況について、<https://www.env.go.jp/press/106477-print.html>
- 4) J. Vymazal: The use of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of Wastewater, Ecological Engineering, Vol.35, pp.1-17, 2009.
- 5) J. Vymazal: Cnstructed wetlans for wastewater treatment, Water, pp.530-549, 2010.
- 6) J. Vymazal: Costructed wetland with emergent macrophytes: From experiments to a high quality treatment technology, Proceedings of 10<sup>th</sup> international conference for water pollution control, Lisbon, Portugal, pp.3-27, 2006.

- 7) J. Vymazal, L. Kröpfelva: Vegetation, Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface flow, Environmental, Pollution 14, pp.355-432, Springer, London, 2008.
- 8) S. Wu, P. Kuschik, J. Vymazal, R. Dong: Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review, Water Research, Vol.57, pp.40-55, 2014.
- 9) J. Ping, A. Guilbert, V. Gangnon, F.Chazarenc: Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems, Ecological Engineering, Vol.80, pp.46-52, 2015.
- 10) S. Wu, P. Kuschik, H. Brix, J. Vymazal, R. Dong: Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review, Water Research, Vol. 57, pp 40-55, 2014.
- 11) H. Brix, C. A. Arias: The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines, Ecological Engineering, Vol.25, pp.491-500, 2005.
- 12) P. Cooper: What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over 20 years, Desalination, Vol.246, p.11-26, 2009.
- 13) 矢野篤男：人工湿地の浄化機構と普及への課題，環境技術，Vol.46, No. 11, pp.568-574, 2017.
- 14) 中野和典，大附遼太郎，中村和徳，橋本純：人工湿地を活用した生活排水の高度処理，用水と廃水，Vol. 57, No. 11, pp. 835-843, 2015.
- 15) 鈴木援，谷口崇至，中野和典：ろ床の重層化が多段式人工湿地の下水浄化性能に及ぼす影響，水環境学会誌，Vol. 44, No. 4, pp. 85-93, 2021.
- 16) K. R. Edwards, H. Cizkova, K. Zemanova, H. Santruckova: Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*, Ecological Engineering, Vol. 27, No. 2, pp.153-165, 2016.
- 17) X. Zhai, N. Piwpuan, C. A. Arias, T. Headley, H. Brix: Can root exudates from emergent wetland fuel denitrification in subsurface flow constructed wetland systems ?, Ecological Engineering, Vol. 61, pp. 555-563, 2013.
- 18) 加藤邦彦，井上京，家次秀浩，辻 盛生，菅原保英，張 暁萌，原田 純，泉本隼人，青木和彦：有機排水を冬期も含め長期期間安定して浄化できる多段式伏流式人工湿地ろ過システム，土壤肥料学雑誌，Vol.87, No.6, pp.467-471, 2016.
- 19) M. Rozkosny, J. Salec J., J. Salec: Water Balance of the Constructed Wetlands-A Study of the Macrophytes Evapotranspiration, Proceeding of 10<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Pollution Control, Lisbon, Portugal, pp.123-129, 2006.
- 20) T. Headley, R., Davidson L., D. O. Huett, R. Muller: Evapotranspiration with *Phargmites australis* in sub-tropical Australia, Water Research, Vol. 46, pp. 345-354, 2012.
- 21) T. Yano, K. Yamada, M. Nakayama, A. Inoue-Kohama, S. Sato, K. Enari: Influence of Growth of Reeds on Evapotranspiration in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands, Environment and Ecology Research, Vol. 5, No.6, pp. 427-435, 2017.
- 22) T. Yano, M. Nakayama, K. Yamada, A. Inoue-Kohama, S. Sato, K. Enari: Effect of Reed Vegetation on Evapotranspiration and Treatment Performance with Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in the Treatment of Landfill Leachate, Environment and Ecology Research, Vol.9, No.1, pp. 30-38, 2021.