

令和2年度学内公募研究（実用化型）  
〔研究論文〕

## 高塩分浸出水を処理する多段式人工湿地の処理特性

矢野 篤男<sup>1)</sup>, 中山 正与<sup>2)</sup>, 山田 一裕<sup>3)</sup>, 松浦 豊<sup>4)</sup>,  
小浜 暁子<sup>1)</sup>, 江成敬次郎<sup>1)</sup>, 佐藤 真哉<sup>5)</sup>

### Treating Performance with Multi-stage of Constructed Wetland in the Treatment of High Salinity Landfill-Leachate

Tokuo YANO<sup>1)</sup>, Masatomo NAKAYAMA<sup>2)</sup>, Kazuhiro YAMADA<sup>3)</sup>, Yutaka MATSUURA<sup>4)</sup>,  
Akiko KOHAMA<sup>1)</sup>, Keijiro ENARI<sup>1)</sup>, Shinya SATO<sup>5)</sup>

#### Abstract

In this study, the treating performance with the multi-stage of hybrid constructed wetlands in the treatment of high salinity landfill leachate were estimated. The salinities of the inflow and the outflow of the constructed wetland were in the range of 12-18g Cl/L. The growth of the constructed wetland reeds, especially the first stage of constructed wetland reeds was remarkably inhibited by the high salinity. The average of removal rates of BOD, COD, TN and NH<sub>4</sub>-N were 98.9%, 72.2%, 53.6% and 57.2%, respectively. BOD, COD, TN and NH<sub>4</sub>-N showed stable processing efficiencies throughout experimental periods. Most of BOD were removed by the second stage of the constructed wetland, and COD, TN, and NH<sub>4</sub>-N were removed gradually from the first stage to third stage. The treating performances of multi-stage of constructed wetland have been greatly improved compared to those of the two stage of constructed wetland. The load reduction rates calculated from the water budget were 7-12% higher than the removal rates calculated from the concentration. The obtained results from in this study showed that the treatment of landfill leachate with the multistage constructed wetlands could be regarded as a full applicable waste water treatment technology.

- 
- 1) 東北工業大学環境応用化学科 客員研究員  
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
  - 2) 東北工業大学都市マネジメント学科 教授  
Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology
  - 3) 東北工業大学環境応用化学科 教授  
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
  - 4) 東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻  
Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology
  - 5) 仙台環境開発(株)環境技術室 係長  
Sendai Kankyo Kaihatsu Co., Ltd.

## 1 はじめに

人工湿地による汚水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>1)</sup>。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>2)</sup>。また、ヨーロッパでは廃棄物処分場浸出水処理においても省エネルギー、低コスト、環境に調和している排水処理技術として人工湿地による処理が推奨されている<sup>3)</sup>。英国では2007年時点で人工湿地は1,005ヶ所でそのうち処分場浸出水を処理する人工湿地は24ヶ所であった<sup>4)</sup>。一方、わが国においては2005年に北海道別海町にわが国第一号の畜産排水を処理する人工湿地の運用が始まり<sup>5)</sup>、現在、わが国では畜産排水、パーラー排水、生活排水処理のために約30近い人工湿地が稼働している。しかし、わが国では人工湿地を用いた処分場浸出水の処理の事例はないが、この数年、矢野らによってパイロットスケール人工湿地による多くの報告がなされてきた<sup>6-10)</sup>。わが国では廃棄物の多くは中間処理施設で焼却によって減容化され、その焼却灰は最終処分場に埋め立てられている。埋立地では雨水などが浸透し、浸出水として処分場から排出される。

浸出水の水質特性として、さまざまな化学物質などが含まれており、BOD濃度に対してCOD濃度が高く、CODの多くは難分解性の有機物となっている<sup>11)</sup>。またTN中でNH<sub>4</sub>-Nの割合が著しく高いのも特徴的である。さらに特徴的なこととして埋め立てられている焼却灰は大量の塩分を含むため浸出水中の塩分濃度は18-21gCl/Lとなりほぼ海水と同程度である<sup>7,10)</sup>。このような浸出水の処理には多くのエネルギーやコストを要している。特に埋立を終了した処分場では浸出水水質が国の基準を下回るまで数十年以上も水質管理をしていかなければならない<sup>12)</sup>。このように最終処分場の浸出水水質が安定化するまで長期間の排水管理が求められることから、省エネルギー、低コストで処理できる手法が望まれている。

筆者らはこれまで水平流伏流式人工湿地を用いて廃棄物処分場の高塩分を含む浸出水の処理を行い、水平流人工湿地におけるヨシの生育と蒸発散の関係ならびに蒸発散の浸出水処理に及ぼす影響を明らかにしてきた<sup>6-8)</sup>。また、鉛直流人工湿地における蒸発散の水収支に及ぼす影響<sup>9)</sup>ならびに2段式ハイブリッド型人工湿地のヨシの生育が蒸発散と処理効率に与える影響について明らかにしてきた<sup>10)</sup>。

筆者らは前報<sup>10)</sup>において高塩分浸出水を処理する2段式ハイブリッド型人工湿地の処理特性を報告し、2段式ハイブリッド型人工湿地ではBOD、COD、TN、NH<sub>4</sub>-Nの1-3月の冬期における処理効率の低下が認められ、人工湿地システムの改善が求められた。本研究では人工湿地による処分場浸出水処理の一層の効率化を目的に多段式ハイブリッド型人工湿地の処理特性について検討した。

## 2 実験方法

### 2-1 人工湿地概要

仙台市内のS産業廃棄物埋立地処分場内に設置した多段式人工湿地（1段目：鉛直流、2段目：鉛直流-水平流、3段目：鉛直流）を用いた。人工湿地のサイズは1段目、2段目、3段目ともに[長さ2 m × 幅1 m × 深さ0.6m]であった。2段目人工湿地の水平流

における水位を人工湿地底面から30cmとした。流入水量は1回14Lを1日に5回間欠的に流入させた。人工湿地の採水地点は流入水, 1段目, 2段目, 3段目人工湿地流出水の計4地点とした。3つの人工湿地の上流側と下流側の2ヶ所にEh電極を表面から15, 30, 45cmの深さに設置し, 人工湿地内部のEhを測定した。

また, 人工湿地の蒸発散量を測定するために流出量は人工湿地の流出口に量水計を設置し, 連続的に測定した。

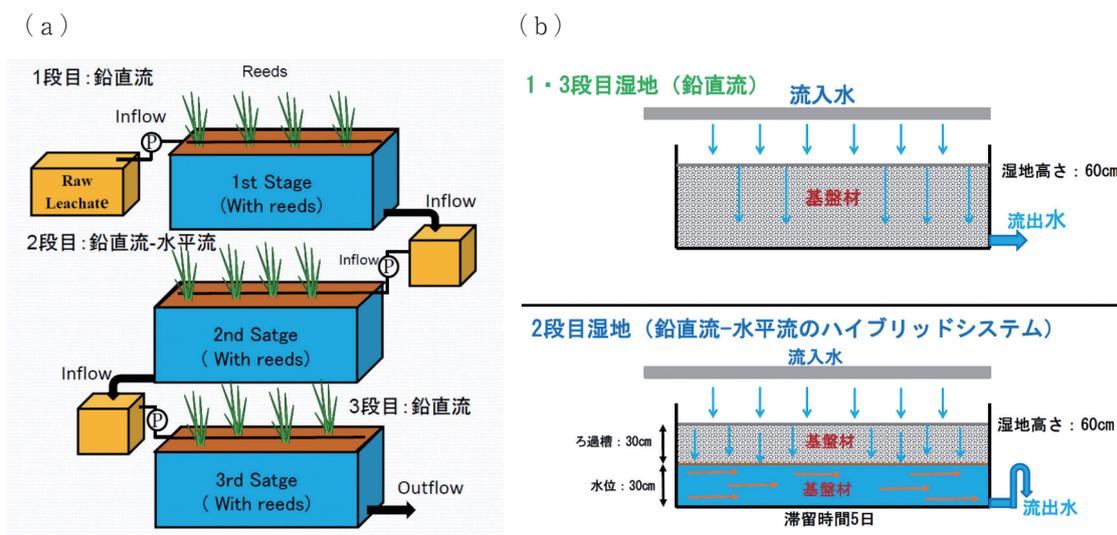


図1 人工湿地内部の概要 (a: 全体図, b: 1・3段目, 2段目人工湿地の断面図)

## 2-2 測定項目

EC, pH, COD, BOD, TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TPは実験室にて測定し, ヨシの生育調査(稈長および稈数)ならびに流入水量測定は現地で2回/月の頻度で実施した。また, 現地の気象データ(気温・降雨量)はS処分場より提供された。実験期間は2020年4月1日~2021年3月31日であった。

## 3 結果及び考察

### 3-1 人工湿地の塩分濃度とヨシの生育

図2に人工湿地の流入水, 1段目人工湿地, 2段目人工湿地, 3段目人工湿地流出水の塩分濃度の変化, 表1に人工湿地の流入水, 1段目人工湿地, 2段目人工湿地, 3段目人工湿地流出水の平均塩分濃度を示す。図より流入水すなわち浸出水原水の塩分濃度は14.3~19.6gCl/Lの範囲にあり, 1年間の平均濃度は $16.5 \pm 2.2$ gCl/Lであった。1段目人工湿地流出水では13.1~20.1gCl/Lの範囲にあり, 1年間の平均濃度は $15.2 \pm 2.7$ gCl/Lであった。

2段目人工湿地流出水では6.7~18.7gCl/Lの範囲にあり, 1年間の平均濃度は $13.1 \pm 3.9$ gCl/L, 3段目人工湿地流出水では3.7~18.9gCl/Lの範囲にあり, 1年間の平均濃度は $11.4 \pm 4.7$ gCl/Lであった。このように人工湿地の塩分濃度は1段目, 2段目, 3段目と段数を経るにしたがい塩分濃度は低くなった。塩化物濃度が低くなる理由は不明である。中山ら<sup>13)</sup>は砂を充填したカラムを用いた浸出水の浄化試験で流出水中の塩化物濃度

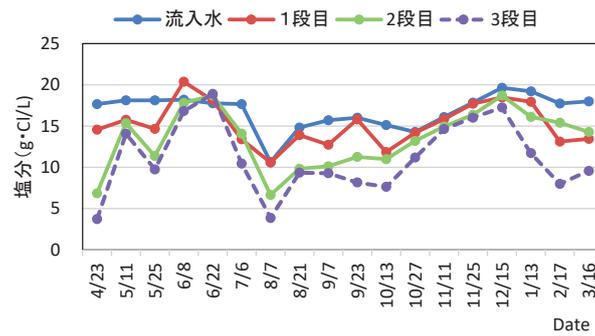


図2 人工湿地の塩分濃度の変化

表1 人工湿地の流入水, 1段目, 2段目, 3段目人工湿地の塩分濃度

	Salinity (g · Cl/L)
流入水	16.5 ± 2.2
1段目	15.2 ± 2.7
2段目	13.1 ± 3.9
3段目	11.4 ± 4.7

は流入水より低かったと報告しており、塩化物がカラム内に吸着された可能性を述べている。

ヨシの生存限界の塩分濃度は12～15gCl/Lであると報告されている<sup>14,15)</sup>。表1で示した様に本人工湿地では1段目, 2段目, 3段目の人工湿地ではほぼヨシの生育限界の塩分濃度の範囲にありヨシの生育に対して厳しい生育条件であった。図3に1段目から3段目の人工湿地におけるヨシの最大稈長ならびに稈数を示す。

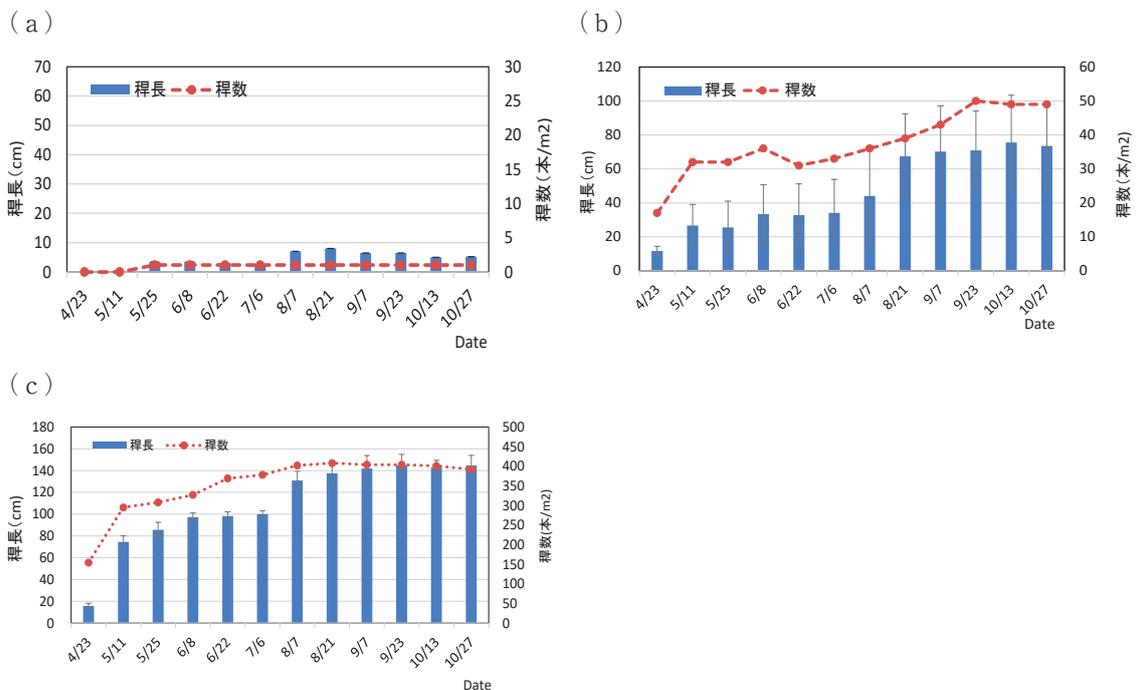


図3 人工湿地のヨシの生育の変化

(a : 1段目人工湿地のヨシ, b : 2段目人工湿地のヨシ, c : 3段目人工湿地のヨシ)

ヨシの最大稈長は生育の良好な上位30本を測定し、その平均値をヨシの最大稈長とした。また稈数は単位面積当たりのヨシの本数とした。表2に各段湿地におけるヨシの生育調査の結果を示す。表より1段目人工湿地の植栽後3年目のヨシでは最大稈長は8.0cm、稈数は1本/m<sup>2</sup>、2段目人工湿地では最大稈長75.5 ± 27.9cm、稈数50本/m<sup>2</sup>であった。また、植栽後7年目の3段目ヨシでは最大稈長144.8 ± 10.1cm、稈数404本/m<sup>2</sup>となった。このように1段目人工湿地では塩分濃度が15.2 ± 2.7gCl/Lとヨシの生育限界の濃度であることからヨシの生育は著しく悪かった。一方、3段目人工湿地では塩分濃度が1段目、2段目人工湿地より低いことからヨシは旺盛な生育を示した。しかし、淡水域のヨシと比べると高塩分の影響により稈長の伸長は著しく抑制されていた。

表2 人工湿地の1段目、2段目、3段目でのヨシの生育結果

	最大稈長 (cm)	稈数 (本/m <sup>2</sup> )
1段目	8	1
2段目	75.5 ± 27.9	50
3段目	144.8 ± 10.1	404

### 3-2 人工湿地内部のEh

図4に人工湿地内のEhを示す。1段目の鉛直流人工湿地のEhはA2-15を除いて深さ15～45cmで400～700mVであった。2段目(鉛直流-水平流)ハイブリッド式人工湿地では鉛直流条件下の深さ15、30cmでのEhは400～700mVの範囲にあり、水平流条件下の深さ45cmでは200～300mVにあったことから、2段目人工湿地の鉛直流領域ではEhは酸化的であり、水平流領域では微好氣的もしくは還元的となっていたと思われた。3段目の鉛直流人工湿地では電極の深さに関わらず200～700mVの範囲でのEhを示していた。3段目人工湿地では人工湿地内部で酸化的領域と還元的領域がパッチ状に分布しているものと思われた。脱窒はおおよそ100～350mVで始まる<sup>16)</sup>とされており、3段目人工湿地においても脱窒の進行が期待されると思われた。

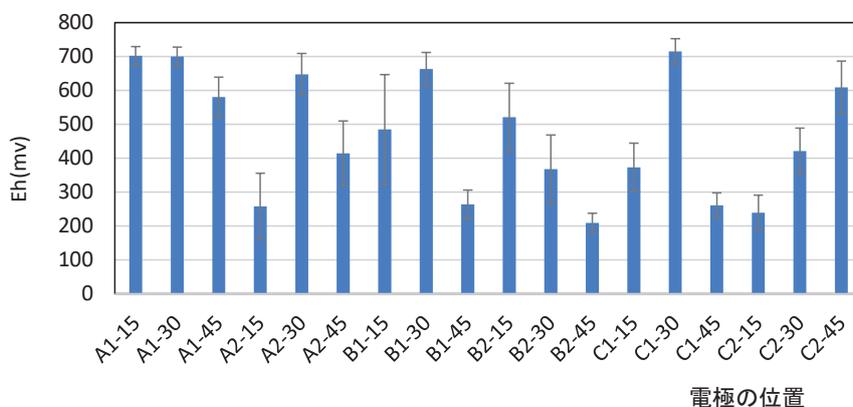


図4 人工湿地内部のEh (A: 1段目人工湿地, B: 2段目人工湿地, C: 3段目人工湿地)  
(A, B, Cの次の数字の1は上流側, 2は下流側を示し、ハイフオンの次の数字は電極の深さ (cm) を示す。)

### 3-3 流入濃度, 流出濃度, 除去率の変化

図5, 6, 7, 8にBOD, COD, TNおよびNH<sub>4</sub>-Nの流入濃度, 流出濃度および平均除去率の変化を示す。図5のBODでは流入水は9.5～60.2mg/Lの範囲にあり, 流入水の平均濃度は $36.2 \pm 13.6$ mg/L, 流出水は0～0.9mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度は $0.4 \pm 0.3$ mg/L, 平均除去率は $98.8 \pm 0.9$ %であった。図6のCODでは流入水は160～359mg/Lの範囲にあり平均濃度は $287.5 \pm 4$ mg/L, 流出水は42～124mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度 $79.8 \pm 24.2$ mg/L, 平均除去率は $72.2 \pm 7.9$ %であった。BODは年間を通して除去率は99%前後で推移し非常に高い処理効率を示した。一方, CODにおいては年間を通じて70%前後の除去率で推移し安定した除去率を示した。図7のTNでは流入水は234～425mg/Lの範囲にあり平均流入水濃度は $366.9 \pm 48.2$ mg/L, 流出水は52～270mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度 $170.1 \pm 60.3$ mg/L, 平均除去率は $53.6 \pm 14.8$ %であった。図8のNH<sub>4</sub>-Nでは流入水は238～404mg/Lの範囲にあり平均濃度は $332.2 \pm 46.0$ mg/L, 流出水は57～248mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度 $174.7 \pm 48.5$ mg/L, 平均除去率は $57.4 \pm 13.0$ %であった。

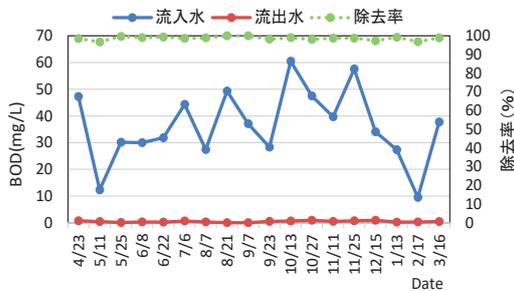


図5 BODの濃度と除去率の変化

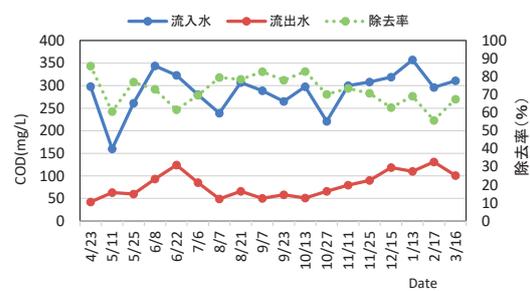


図6 CODの濃度と除去率の変化

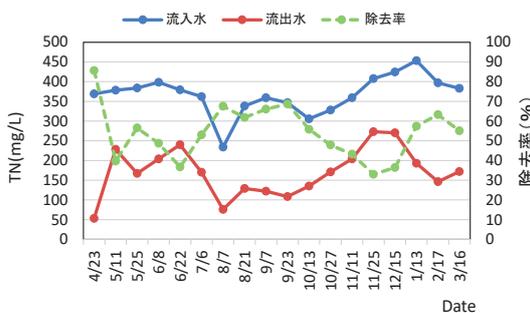


図7 TNの濃度と除去率の変化

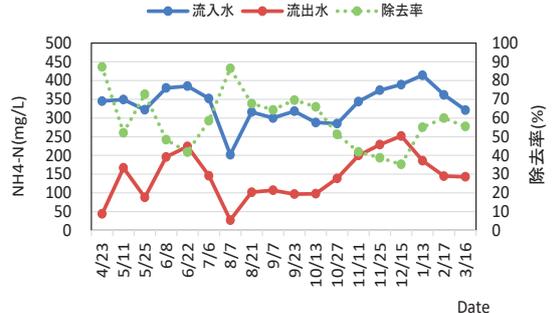


図8 NH<sub>4</sub>-Nの濃度と除去率の変化

### 3-4 人工湿地の処理効率の季節変化

表3にCOD, BOD, TNおよびNH<sub>4</sub>-Nの季節ごとの処理効率を示す。CODは4月～12月までは除去率は72～77%の範囲にあり安定した処理を示したが, 1月～3月では64.5%となり幾分低下した。BODは1年間を通じて99%前後となり高い除去率を示した。一方, TNでは4月～6月で53.2%, 7月～9月では63.1%, 1月～3月では58.6%であったが, 10月～12月で42.3%となり他の季節と比べて低い値を示した。また, NH<sub>4</sub>-Nでは4月～6月で59.6%, 7月～9月では67.8%, 1月～3月56.8%であった。一方, 10月～

12月で45.4%となり他の季節と比べて低い値を示した。TNおよびNH<sub>4</sub>-NではCOD、BODと比べて季節ごとの処理効率の安定はやや低下していた。

表3 COD・BOD・TNおよびNH<sub>4</sub>-Nの季節別処理効率

			4月－6月	7月－9月	10月－12月	1月－3月
COD	流入水	mg/L	277.2 ± 72.4	276.0 ± 25.7	289.1 ± 39.0	321.3 ± 31.8
	流出水	mg/L	76.4 ± 32.3	61.6 ± 14.8	81.0 ± 25.6	114.0 ± 15.4
	除去率	%	72.4 ± 10.7	77.2 ± 4.8	72.0 ± 7.2	64.5 ± 7.3
BOD	流入水	mg/L	30.3 ± 10.6	37.3 ± 9.6	47.9 ± 11.3	24.8 ± 14.3
	流出水	mg/L	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.3	0.7 ± 0.2	0.3 ± 0.1
	除去率	%	98.9 ± 1.2	99.2 ± 0.8	98.5 ± 0.7	98.8 ± 1.3
TN	流入水	mg/L	381.6 ± 10.6	327.9 ± 53.4	364.9 ± 50.7	411.0 ± 37.0
	流出水	mg/L	178.4 ± 75.4	121.1 ± 34.1	210.6 ± 60.7	170.3 ± 23.5
	除去率	%	53.2 ± 19.6	63.1 ± 6.4	42.3 ± 9.1	58.6 ± 4.2
NH <sub>4</sub> -N	流入水	mg/L	356.2 ± 26.2	297.6 ± 56.7	336.0 ± 48.0	365.7 ± 46.6
	流出水	mg/L	143.8 ± 75.4	75.4 ± 95.9	183.6 ± 63.9	158.0 ± 24.3
	除去率	%	59.6 ± 18.9	67.8 ± 10.5	45.4 ± 12.3	56.8 ± 2.7

### 3-5 人工湿地ごとに達成された除去率

湿地ごとに達成された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, 3段目流出水濃度をC<sub>3</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。

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

$$2 \text{ 段目湿地除去率} = 100 \times (C_0 - C_2) / C_0 (\%)$$

$$3 \text{ 段目湿地除去率} = 100 \times (C_0 - C_3) / C_0 (\%)$$

図9にCODおよびBODの各人工湿地ごとに達成された除去率を示す。CODでは1段目で40.7%, 2段目で58.5%そして3段目では72.2%となり, 人工湿地ごとにCOD除去率は段階的に上昇した。一方, BODでは1段目で68.9%, 2段目で97.0%そして3段目では98.8%となり, 2段目までにBODは速やかに除去された。処分場浸出水のBODは2段目までの人工湿地により容易に除去可能であった。一方, CODでは3段目までの除去率は72%となりBODと比べて処理効率は低かった。これはCODの成分として難分解性の有機物が含まれていることによるものと思われた。

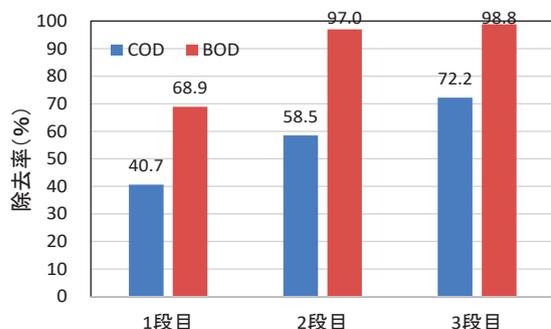


図9 COD・BODの人工湿地ごとの処理効率

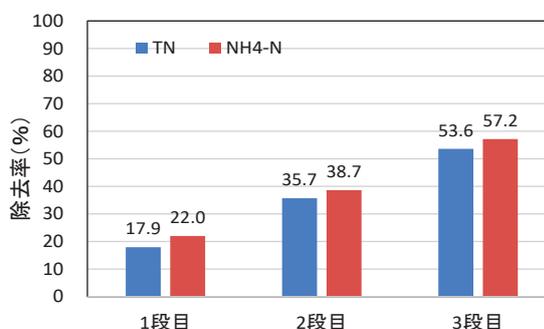


図10 TN・NH<sub>4</sub>-Nの人工湿地ごとの処理効率

図10にTNおよびNH<sub>4</sub>-Nの人工湿地ごとに達成された除去率を示す。TNでは1段目で17.9%，2段目で35.7%そして3段目では53.6%であった。NH<sub>4</sub>-Nではそれぞれ22.0%，38.7%，57.2%であった。TNおよびNH<sub>4</sub>-NはCODと同様に人工湿地ごとに段階的に除去されており，両者の処理の傾向はよく似ていた。CODと比べて除去率は低く，両者ともに処理がしにくい化学的形態となっていると思われた。

### 3-6 人工湿地ごとの処理特性

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，3段目流出水濃度をC<sub>3</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。

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

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

$$3 \text{ 段目湿地除去率} = 100 \times (C_2 - C_3) / C_2 (\%)$$

図11にCOD，BOD，TNおよびNH<sub>4</sub>-Nの各段の人工湿地ごとの処理特性を示す。

CODは1段目が除去率をもっとも高く，2段目，3段目はほぼ同程度であった。

写真1に示すように浸出水原水の流入水の懸濁物は1段目人工湿地を通過後，その多くが除去されていることが分かる。これはCODの主な成分の不溶性の有機物が主に1段目人工湿地で除去されたものと思われた。BODは2段目で最も除去率は高く除去率は90.3%を示し，3段目では除去率は低下し61.4%となった。しかしこれはBODが1段目，2段目でBODの97%が除去されたことにより，3段目では除去すべきBODがなくなったためによるものと思われる。TNでは1段目，2段目，3段目人工湿地と後段に行くほど人工湿地ごとの処理効率は高くなっていった。3段目人工湿地は鉛直流人工湿地であるため一般的には脱窒は起こりにくく，TN除去は低いとされてきた。ところが本研究では3段目の鉛直流人工湿地においても幾分脱窒は進行しておりTN除去がなされていた。これはEh測定で示した様に，3段目人工湿地でのC1-45，C2-15でEhは250mVを示し脱窒反応が可能な電位であった。また，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言われている<sup>17,18)</sup>。3段目人工湿地は旺盛なヨシの生育を示しており，ヨシの根茎からの有機物を利用して脱窒が促進しTNが除去されたものと思われた。

NH<sub>4</sub>-Nでは1段目，2段目，3段目湿地の除去率はそれぞれ22.0%，21.8%，29.8%となった。本人工湿地システムでは1段目は鉛直流，2段目は鉛直流-水平流のハイブリッド型，

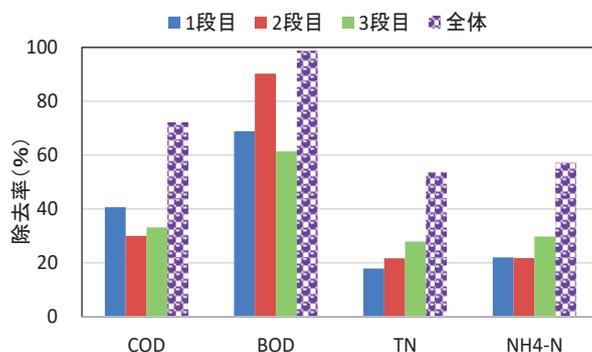


図11 人工湿地ごとの処理特性



写真1 原水, 人工湿地1段目, 2段目, 3段目の処理水の様子

3段目では鉛直流となっている。2段目ハイブリッド型湿地は1段目の鉛直流人工湿地と同程度の $\text{NH}_4\text{-N}$ の除去能を有していた。

### 3-7 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。

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

$C_{in}$ 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

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

$Q_{in}$ 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

本研究における多段式人工湿地における日蒸発散量はこれまでの研究<sup>9,10)</sup>から得られた各段湿地の蒸発散量から求めると平均日蒸発散量は6.5mm/dであった。表4に2020年4月～2021年3月までのBOD, COD, TNおよび $\text{NH}_4\text{-N}$ の流入水および流出水の濃度から求めた平均除去率と, 流入負荷量と流出負荷量から求めた平均負荷削減率を示す。表4に示すようにBODでは除去率は98.9%であるのに対し負荷削減率では99.2%となった。同様にCODでは除去率72.2%に対し負荷削減率79.4%, TNでは除去率53.6%に対し負荷削減率65.5%そして $\text{NH}_4\text{-N}$ では除去率57.2%に対し負荷削減率68.2%であった。人工湿地

では流入水と流出水の濃度から求めた除去率と流入負荷量と流出負荷量から求めた負荷削減率ではBODを除いて他の項目で大きな違いが認められた。人工湿地では蒸発散により人工湿地内の水分が失われることにより人工湿地の処理効率は大きく影響を受けていた。

表4 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	36.2	287.5	366.9	335.9
流出濃度	mg/L	0.4	79.8	170.1	143.9
除去率	%	98.9	72.2	53.6	57.2
流入水量	L/d・m <sup>2</sup>	10.9	10.9	10.9	10.9
流出水量	L/d・m <sup>2</sup>	8.1	8.1	8.1	8.1
流入負荷量	g/d・m <sup>2</sup>	0.395	3.134	3.999	3.661
流出負荷量	g/d・m <sup>2</sup>	0.003	0.646	1.378	1.166
負荷削減率	%	99.2	79.4	65.5	68.2

### 3-8 多段式人工湿地の処理性能

2020年度において多段式人工湿地を用いて高塩分を含む処分場浸出水処理について検討し、一方、2019年度では2段式ハイブリッド型人工湿地を用いて検討を行った。

表5に2019年度と2020年度における処理効率の比較を示す。表よりBOD、COD、TN、NH<sub>4</sub>-Nでは多段式人工湿地が2段式人工湿地より高い処理効率を得ることができた。

表5 2段式人工湿地と多段式人工湿地の処理効率の比較

		2019	2020
BOD	%	93.7 ± 2.7	98.9 ± 0.9
COD	%	59.7 ± 8.4	72.2 ± 7.9
TN	%	35.3 ± 13.7	53.6 ± 14.8
NH <sub>4</sub> -N	%	47.3 ± 13.0	57.2 ± 16.4

表6に2段式人工湿地と多段式人工湿地における処理量原単位を示す。

表6 2段式人工湿地と多段式人工湿地の処理量原単位の比較

	単位	BOD	COD	TN	NH <sub>4</sub> -N
2段式人工湿地	g/d・m <sup>2</sup>	0.756	3.340	2.750	3.120
多段式人工湿地	g/d・m <sup>2</sup>	0.392	2.488	2.621	2.495

表に示すように2段式人工湿地と多段式人工湿地の処理量原単位では多段式人工湿地は2段式人工湿地よりも低い傾向を示した。2段式人工湿地と多段式人工湿地の処理効率の比較では多段式人工湿地が2段式人工湿地より高い処理効率を示したが、これは2段式人工湿地では処理面積が4 m<sup>2</sup>、多段式人工湿地では6 m<sup>2</sup>であり、多段式人工湿地が2段式人工湿地より処理面積が増えたことによる効果と考えられた。

図12に多段式人工湿地による処理とS処分場の水処理施設における処理の比較を示す。図に示すように高塩分浸出水を処理する多段式人工湿地の処理効率はBOD、COD、TN

およびNH<sub>4</sub>-Nのすべての項目において処分場の水処理施設における処理効率よりも高い値を示した。すなわち高塩分浸出水を処理する多段式人工湿地は十分に適用可能な排水処理技術としてみなすことができる。

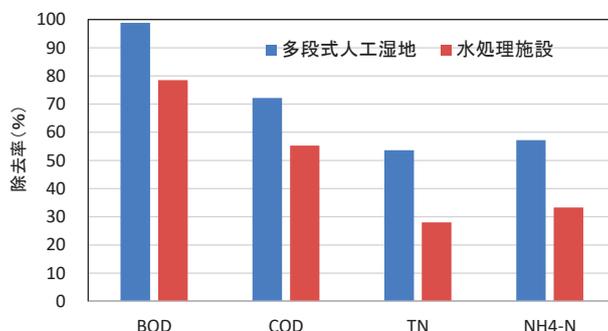


図12 多段式人工湿地による処理と処分場水処理施設による処理の比較

#### 4 まとめ

多段式ハイブリッド型人工湿地を用いて高塩分浸出水処理における処理特性について検討した。BODの処理効率は年間を通じ98.9%，CODは72.2%，TNは53.6%およびNH<sub>4</sub>-Nは57.2%を示し、1年間を通じて安定した処理が達成でき、昨年度の2段式人工湿地と比べて処理効率は大きく改善された。各段湿地で達成された処理効率ではBODは2段目までにほぼすべてのBODが除去され、COD、TN、NH<sub>4</sub>-Nでは1段目から3段目まで段階的に処理は進んでいた。またBOD、COD、TN、NH<sub>4</sub>-Nの各段湿地での処理特性では各湿地で処理傾向が異なっており、BOD、CODでは1段目、2段目で高い処理傾向を示し、TN、NH<sub>4</sub>-Nでは後段の湿地で高い処理傾向を示した。特にTNでは3段目鉛直流人工湿地で処理効率が最も高い値を示した。これは3段目人工湿地ではヨシの生育が旺盛であったことから脱窒に必要なヨシ根茎からの有機物の供給、人工湿地内部に還元的な領域があることによるものと思われた。水収支法に基づいて求めた負荷削減率は濃度から求めた除去率より7～12%高い値を示し、蒸発散は人工湿地の処理効率に大きな影響を与えていた。多段式人工湿地は2段式人工湿地よりも高い処理効率を示し、かつ現在稼働中の処分場水処理施設よりも高い処理効率を得ることができたことから、多段式人工湿地による処分場浸出水処理は十分に適用可能と思われた。

#### 謝 辞

本研究は東北工業大学研究支援センターの学内公募研究費の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) J.Vymazal: Constructed wetlands for waste water treatment, Water, Vol. 2 (2010), pp. 530-549.
- 2) J. Vymazal: "The Use of Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow for Various Types of Wastewater." In Proceedings of the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, (2008), pp.1-15.

- 3) T.G. Bulc: Long-term performance of a constructed wetlands for landfill leachate treatment, *Ecological Engineering*, Vol. 26, (2006), pp. 365-374.
- 4) 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, (2009), pp.11-26.
- 5) 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 (2017)，pp.568-574.
- 6) T. Yano, M. Okanuma, Y. Kumagai, K. Sato, A. Inoue-Kohama and K. Enari: Effect of Salinity on in the treatment of high salinity landfill-leachate using HSF, *J. Environmental Science and Engineering*, Vol.3, No.3 (2014), pp. 142-150.
- 7) T. Yano, K. Yamada, M. Nakayama, A. Inoue-Kohama, S. Sato and K. Enari: Evapotranspiration and Removal Performance in the Treatment of High Salinity Landfill-Leachate Using HSF, *J. Environmental Science and Engineering*, Vol 5, No. 9 (2016), pp 440-450.
- 8) T. Yano, K. Yamada, M. Nakayama, A. Inoue-Kohama, S. Sato and K. Enari: Influence of Growth of Reeds on Evapotranspiration in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands, *Environment and Ecology Research*, Vol. 5, No.6 (2017), pp.427-435.
- 9) T. Yano, M. Nakayama, K. Yamada, A. Inoue-Kohama, S. Sato and 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 (2021), pp. 30-38.
- 10) 矢野篤男, 中山正与, 山田一裕, 小浜暁子, 江成敬次郎, 佐藤真哉：2段式ハイブリット型人工湿地を用いた高塩分浸出水処理における水収支と処理効率，東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS, Vol. 33, No.1 (2021), pp. 105-113.
- 11) E. A. McBea and F. Rovers: Landfill leachate characteristics as inputs for the design of wetlands used as treatment systems, Mulamoottil G., McBean E.A. Rovers, F., editor, *Constructed Wetlands for the Landfill Leachate*, Leis Publishers, London, (2009), pp. 1-16.
- 12) 鈴木大樹：埋め立て終了後と埋立中廃棄物処分場浸出水の水質特性，2009年度 東北工業大学工学部環境情報工学科 卒業論文要旨集，(2009)，67-68.
- 13) 中山正与, 江成敬次郎：砂層による埋立汚泥浸出水の浄化について（Ⅱ），東北工業大学紀要Ⅰ：理工学編，第10号，(1990)，pp. 257-265.
- 14) M. J. Barr and H. D. Robinson: 1999. Constructed wetlands for landfill leachate treatment, *Waste Management and Research*, Vol. 17, (1999), pp.498-504.
- 15) A. Mauchamp and F. Mesleard: Salt tolerance *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes, *Aquatic Botany*, Vol. 70, (2001), pp.39-52.
- 16) J. Vymazal and L. Kropfelva: Denitrification, Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface flow, *Environmental Pollution* 14, Springer, London, (2008), pp.35-41.
- 17) K. R. Edwards, H. Cizkova, K. Zemanova and H. Santruckova: Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*, *Ecological Engineering*, Vol. 27, No. 2 (2016), pp. 153-165.
- 18) X. Zhai, N. Piwpuan, C. A. Arias, T. Headley and H. Brix: Can root exudates from emergent wetland fuel denitrification in subsurface flow constructed wetland systems?, *Ecological Engineering*, Vol. 61, (2013), pp. 555-563.
- 19) M. Rozkosny, J. Salec and 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, (2006), pp.123-129.