

令和元年度学内公募研究（実用化型）
〔研究論文〕

2 段階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

矢野 篤男¹⁾, 中山 正与²⁾, 山田 一裕³⁾,
小浜 暁子⁴⁾, 江成敬次郎⁵⁾, 佐藤 真哉⁶⁾

Water budget and treating performance in the treatment of high salinity landfill
leachate with two stage of hybrid constructed wetlands

Tokuo YANO¹⁾, Masatomo NAKAYAMA²⁾, Kazuhiro YAMADA³⁾,
Akiko KOHAMA⁴⁾, Keijiro ENARI⁵⁾, Shinya SATO⁶⁾

Abstract

In this study, the water budget and the treating performance in the treatment of high salinity landfill leachate with the two stage of hybrid constructed wetlands 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 were remarkably inhibited by the high salinity. The average of removal rates of BOD, COD, TN and NH₄-N were 93.8%, 59.4%, 35.6% and 47.6%, respectively. BOD and COD showed stable processing efficiencies throughout experimental periods. BOD, COD, TN and NH₄-N tended to have lower removal rates during the winter periods. In the future, it is necessary to improve the constructed wetland system with less seasonal variation. The constructed wetland in this study had 7.5mm/d of evapotranspiration rate. The load reduction rates calculated from the water budget were 5-7 % higher than the removal rates calculated from the concentration. The evapotranspiration provided the large impact in the treating performance. It is necessary to evaluate the treating performance in consideration of the water budget.

-
- 1) 東北工業大学工学部環境応用化学科 客員研究員
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
 - 2) 東北工業大学工学部都市マネジメント学科 教授
Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology
 - 3) 東北工業大学工学部環境応用化学科 教授
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
 - 4) 東北工業大学工学部環境応用化学科 客員研究員
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
 - 5) 東北工業大学工学部環境応用化学科 客員研究員
Department of Environment and Applied Chemistry, Tohoku Institute of Technology
 - 6) 仙台環境開発(株)環境技術室 係長
Sendai Kankyo Kaihatsu Co., Ltd,

1 はじめに

人工湿地は、処理対象の汚水を目的レベルにまで処理できる様に工学的に設計し、製作した湿地を用いた省エネルギー・低コストの水処理技術であり、環境に調和し、持続可能な排水処理として広く知られている¹⁾。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おり、ヨーロッパでは廃棄物処分場浸出水処理においても用いられている²⁾。わが国においても近年、畜産排水処理などの分野での導入が進んでいる³⁾。また、高濃度の塩分を含んだ処分場浸出水の人工湿地による処理については矢野ら⁴⁻⁶⁾により報告されている。

近年、わが国の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。表1に浸出水水質の一例を示す。

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⁷⁾。またT-N中でNH₄-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。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。特に埋め立て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⁸⁾。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。

我々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⁴⁻⁶⁾、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ならびに処理特性を検討してきた⁹⁻¹²⁾。

本研究では鉛直流人工湿地の改良型として2段式ハイブリッド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について検討した。

表1 処分場浸出水水質の一例

水質項目	値
pH	7.4
BOD	48mg/L
COD	380mg/L
SS	56mg/L
Cl	24000mg/L
鉛	0.01mg/L 未満
ヒ素	0.015mg/L
ホウ素	32mg/L
T-N	430mg/L
NH ₄ -N	410mg/L

2 実験方法

2.1 人工湿地概要

仙台市内S処分場敷地内に設置した2段式ハイブリッド型人工湿地（1段目：鉛直流、2段目：鉛直流－水平流）を用いた（図1）。人工湿地のサイズは1段目、2段目ともに（幅1m×長さ2m×深さ0.6m）であり、基盤材として砂を用いた。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。この時、水平流での滞留時間は5日であった。植栽植物としてヨシを植栽した。流入水量は1回14Lを1日に5回、間欠

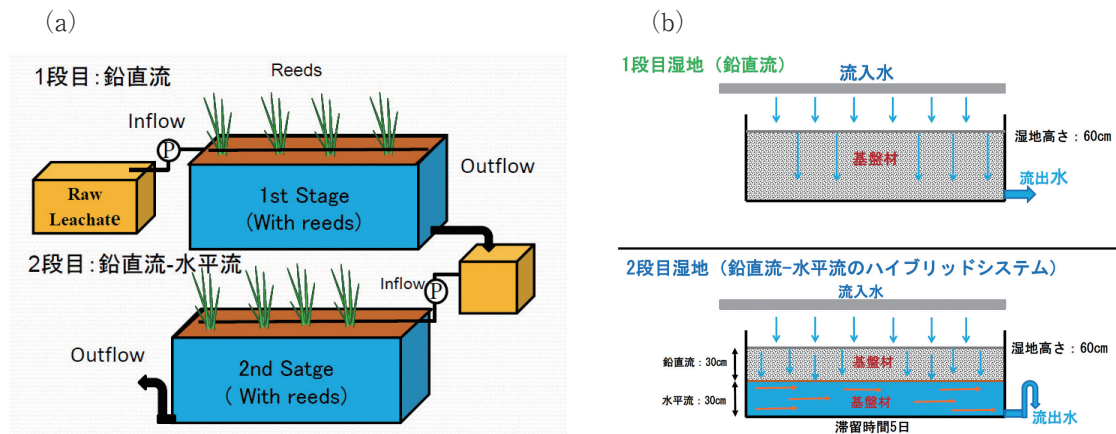


図1 人工湿地内部の概要 (a : 全体図, b : 1 段目, 2 段目湿地の断面図)

的に流入させた。人工湿地の採水地点は流入水, 1 段目と 2 段目の流出水の計 3 地点とした。2つの人工湿地の上流側と下流側の 2ヶ所に ORP 電極を人工湿地表面から 15, 30, 45cmの深さに設置し, 人工湿地内部の ORP を測定した。1 段目湿地の上流側電極を A1-15, 30, 45 および下流側電極を A2-15, 30, 45 とし, 2 段目湿地の上流側電極を B1-15, 30, 45 および下流側電極を B2-15, 30, 45 とした。試料分析のための採水及びヨシの生育調査は毎月 2 回行った。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。

2.2 測定項目

EC, pH, COD, BOD, T-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P 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 2019 年 4 月 1 日 ~ 2020 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

表 2 に人工湿地の流入水および流出水の平均塩分濃度を示す。

1 段目流入水の平均塩分濃度は $16.8 \pm 1.3 \text{ g Cl}^-/\text{L}$, 1 段目出口の塩分濃度は $15.6 \pm 1.6 \text{ g Cl}^-/\text{L}$, 2 段目流出水の塩分濃度は $14.1 \pm 3.4 \text{ g Cl}^-/\text{L}$ であった。人工湿地ではヨシの生存限界であると言われる塩分濃度 ($12 \sim 15 \text{ g Cl}^-/\text{L}$) 範囲にありヨシの生育にとって厳しい生育条件であった。

図 2 にヨシの最大稈長ならびに稈数の変化を示す。ヨシの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。図に示すように 1 段目湿地では最大稈長は $8.8 \pm 5.8 \text{ cm}$, 稈数は 9 本/m², 2 段目湿地では最大稈長 $47.3 \pm 15.5 \text{ cm}$,

表 2 人工湿地の塩分濃度

	Salinity (g · Cl ⁻ /L)
流入水	16.8 ± 1.3
1 段目流出	15.6 ± 1.6
流出水	14.1 ± 3.4

稈数 30 本/m²であった。このように1段目、2段目ともに高塩分の条件下であることからヨシの生育は非常に抑制されており、植栽したヨシの生育は著しく悪かった。

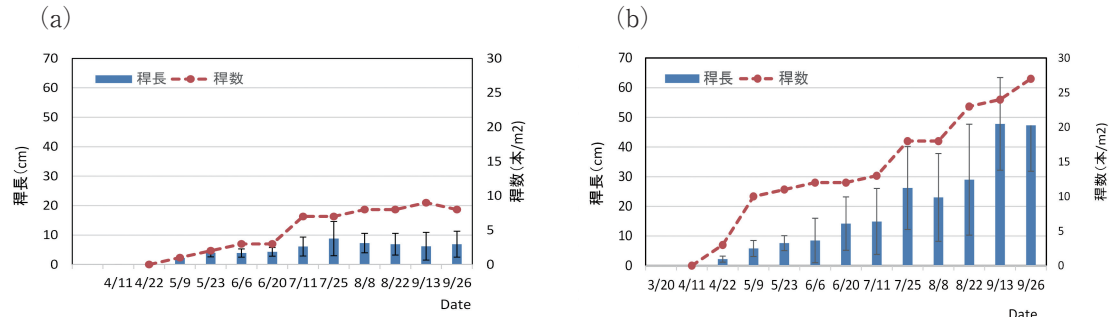


図2 人工湿地ヨシの生育 (a : 1段目湿地のヨシ, b : 2段目湿地のヨシ)

3.2 人工湿地内部のORP

図3に人工湿地内のORPを示す。1段目の鉛直流人工湿地のORPはA1-15, 30, 45で500～700mVとなっていたが、1段目湿地下流側の地表面から15cmのA2-15のORPは約250mVを示し、好氣的である鉛直流人工湿地においても部分的に微好氣的な環境となっていた。一方、2段目の(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ORPは300～600mVの範囲にあり、水平流条件下の深さ45cmでは100～200mVであった。すなわち、2段目湿地の鉛直流領域でORPは酸化的であり、水平流領域では微好氣的であった。脱窒はおおよそ100～350mVで始まると言われており¹³⁾、2段目湿地の水平流領域では脱窒が促進するものと期待された。

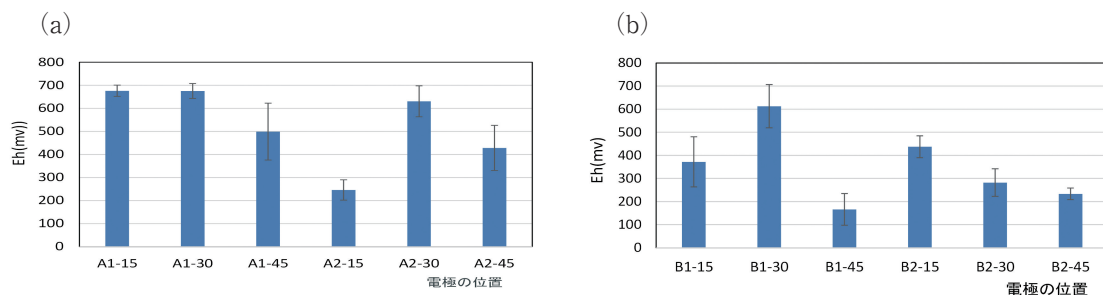


図3 人工湿地内部のORP (a : 1段目湿地, b : 2段目湿地)

3.3 流入濃度, 流出濃度, 除去率の変化

図4, 5, 6, 7にBOD, COD, TNおよびNH₄-Nの変化を示す。図4のBODでは流入水は24.1～104.0 mg/Lの範囲にあり、流入水の平均濃度は45.2 ± 17.7 mg/L, 流出水は0.6～10.2 mg/Lの範囲にあり、平均流出水濃度は2.8 ± 2.4 mg/L, 平均除去率は93.7 ± 2.7%であった。図5のCODでは流入水は250～350 mg/Lの範囲にあり平均濃度は295.4 ± 42.9 mg/L, 流出水は72～240 mg/Lの範囲にあり、平均流出水濃度118.9 ± 49.5 mg/L, 平均除去率は59.7 ± 8.4%であった。BODは年間を通して除去率は95%前後で推移し非常に高い処理効率を示した。一方、CODは5月から12月までは除去率60%以上で推移し

たが、1月～4月までの冬期では処理効率は低下した。図6のTNでは流入水は265～455 mg/Lの範囲にあり平均濃度は 370.4 ± 49.1 mg/L, 流出水は146～327 mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度 239.7 ± 65.0 mg/L, 平均除去率は $35.3 \pm 13.7\%$ であった。図7のNH₄-Nでは流入水は238～404 mg/Lの範囲にあり平均濃度は 332.2 ± 46.0 mg/L, 流出水は57～248 mg/Lの範囲にあり, 平均流出水濃度 174.7 ± 48.5 mg/L, 平均除去率は $47.4 \pm 13.0\%$ であった。

3.4 1段目, 2段目湿地の処理効率の季節変化

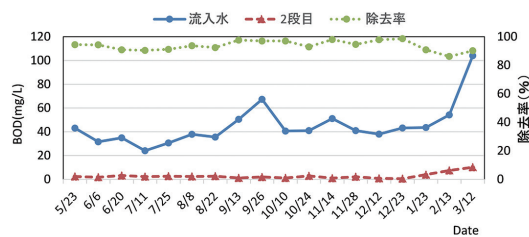


図4 BODの濃度と除去率の変化

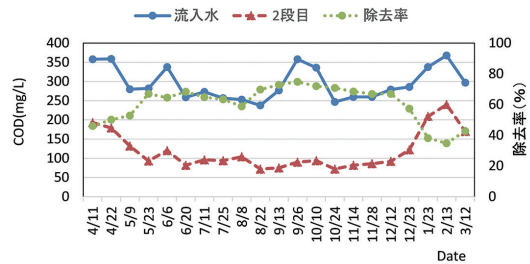


図5 CODの濃度と除去率の変化

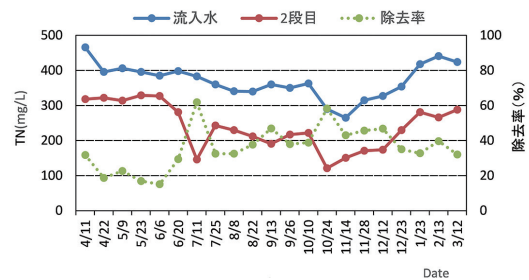


図6 TNの濃度と除去率の変化

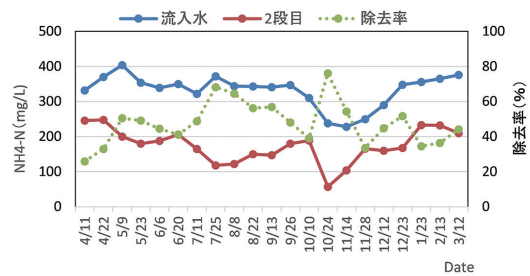


図7 NH₄-Nの濃度と除去率の変化

表3にBOD, 表4にCOD, 表5にTN, 表6にNH₄-Nの湿地ごとの処理効率を示す。表3のBODでは全期間を通じて1段目, 2段目湿地ともに安定した処理効率を示した。表4のCODでは4月～6月で2段目湿地での処理効率が悪い傾向を示した。これは試験開始前の2019年3月に人工湿地の基盤材を砂に入れ替えたことによる影響と思われた。また2020年1月～3月までの冬期において処理効率は低下した。表5のTNでは特に4月～6月, 1月～3月で低い処理効率を示した。2段目湿地を鉛直流-水平流のハイブリッド型にすることで2段目は1段目より処理効率は向上した。CODと同様に基盤材として新たに砂を投入した影響で試験開始後2か月間は人工湿地内の微生物相の順養が不十分だったと思われた。表6のNH₄-Nにおいても4月～6月で1段目, 2段目ともに他の季節より低い傾向にあり, 1月～3月までの冬期において処理効率は低下したことから, 今後, 低温時においても人工湿地が安定した処理効率を得られるように人工湿地システムの改善が必要と思われた。

表3 BODの湿地ごとの季節別処理効率

	4月-6月	7月-9月	10月-12月	1月-3月
1段目 %	81.3 ± 3.0	72.2 ± 4.5	65.2 ± 18.2	64.8 ± 17.5
2段目 %	63.9 ± 12.1	70.8 ± 3.2	89.0 ± 9.9	69.4 ± 6.6
全体 %	93.2 ± 2.0	91.9 ± 1.4	96.6 ± 2.1	89.3 ± 2.5

表4 CODの湿地ごとの季節別処理効率

	4月-6月	7月-9月	10月-12月	1月-3月
1段目 %	42.9 ± 6.4	45.6 ± 6.3	41.6 ± 10.0	22.3 ± 2.8
2段目 %	25.4 ± 11.7	41.1 ± 13.3	47.2 ± 9.2	20.5 ± 6.3
全体 %	57.4 ± 9.6	67.9 ± 4.5	69.2 ± 3.1	38.3 ± 4.0

表5 TNの湿地ごとの季節別処理効率

	4月-6月	7月-9月	10月-12月	1月-3月
1段目 %	12.7 ± 8.6	22.1 ± 11.3	21.0 ± 8.1	12.5 ± 3.2
2段目 %	11.5 ± 4.1	25.5 ± 11.2	31.9 ± 9.2	25.6 ± 6.3
全体 %	22.7 ± 6.8	41.9 ± 14.0	46.2 ± 8.2	34.9 ± 4.2

表6 NH₄-Nの湿地ごとの季節別処理効率

	4月-6月	7月-9月	10月-12月	1月-3月
1段目 %	17.2 ± 7.4	32.3 ± 6.1	28.0 ± 10.7	20.0 ± 5.0
2段目 %	28.8 ± 11.2	36.6 ± 11.7	28.7 ± 17.5	23.1 ± 2.6
全体 %	41.0 ± 9.6	56.9 ± 8.1	48.6 ± 16.5	38.5 ± 5.1

3.5 人工湿地の水収支

植物によ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¹⁴⁾。人工湿地における水収支の概念図を図8に示す。自然の湿地とは異なり、人工湿地では遮水シートにより湿地は被われているので流入した水が人工湿地から漏水することはない。そのため人工湿地における水収支のパラメータは流入水、降雨、蒸発、蒸散そして流出水である。人工湿地における水収支は以下のように表すことができる¹⁵⁻¹⁶⁾。

$$\text{蒸発散量} = \text{流入水量} + \text{降雨量} - \text{流出水量}$$

$$\text{総流入水量} = \text{流入水量} + \text{降雨量}$$

$$\text{蒸発散量} = \text{蒸発量} + \text{蒸散量}$$

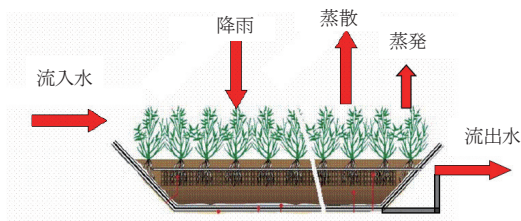


図8 人工湿地の水収支

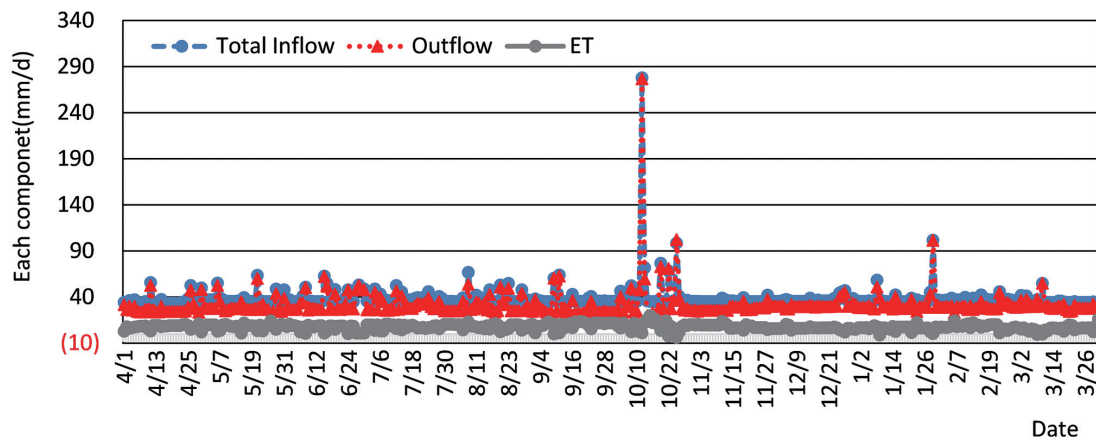


図9 水収支の日変化

図9に2019年4月1日～2020年3月31日までの1年間の人工湿地の水収支の日変化を示す。実験期間中の平均総流入水量は 39.0 ± 14.7 mm/d, 平均流出水量は 31.5 ± 16.1 mm/d, 平均蒸発散量は 7.5 ± 3.3 mm/dであった。実験期間を通じて最も高い蒸発散量は20 mm/d, 最も低い蒸発散量は -3.8 mm/dであった。季節別にみると4月～6月での平均蒸発散量は7.5 mm/d, 7月～9月では8.6 mm/d, 10月～12月では7.5 mm/d, そして1月～3月では6.2 mm/dであった。1年を通じて人工湿地における蒸発散量は季節的な大きな変動は少なかった。

図10に人工湿地の総流入水量に対する蒸発散の比の月ごとの変化を示す。すなわち人工湿地に流入した全水量のうち蒸発散により人工湿地から失われた水量の割合を示している。

図より最も蒸発散量が高い月は9月では総流入水量の27.1%が蒸発散として人工湿地から失われた。最も低い月は12月では16.7%であった。年間を通じた平均は20.8%となり, 人工湿地からは多量の水が蒸発散により失われていた。

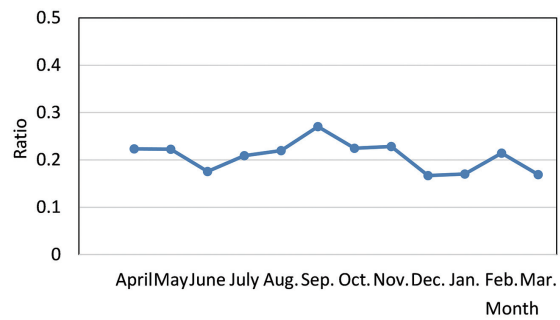


図10 総流入水量に対する蒸発散量の比

3.6 除去率と負荷削減率

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(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(2)にて求めた。

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

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 (mg/L)

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

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 (mg)

本研究では人工湿地の流入水量，降雨量，流出水量を連続して測定して1年間の蒸発散量を求め，平均日蒸発散量は $7.5 \pm 3.6\text{mm}$ であった。表7に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を示す。表に示すようにBODでは除去率は93.8%であるのに対し負荷削減率では94.5%となった。同様にCODでは除去率59.7%に対し負荷削減率64.0%，TNでは除去率35.1%に対し負荷削減率42.2%そして $\text{NH}_4\text{-N}$ では除去率47.6%に対し負荷削減率53.3%であった。この様に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差が認められた。人工湿地では蒸発散により人工湿地内の水が失われることにより人工湿地の処理効率は影響を受けていたことになる。

表7 除去率と負荷削減率

		BOD	COD	TN	$\text{NH}_4\text{-N}$
流入濃度	mg/L	45.2	295	370	332
流出濃度	mg/L	2.8	119	240	174
除去率	%	93.8	59.7	35.1	47.6
流入水量	L/d · m ²	17.65	17.65	17.65	17.65
流出水量	L/d · m ²	15.73	15.73	15.73	15.73
流入負荷量	g/d · m ²	0.80	5.21	6.53	5.86
流出負荷量	g/d · m ²	0.044	1.87	3.78	2.74
負荷削減率	%	94.5	64.0	42.2	53.3

4 まとめ

2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効率と蒸発散について検討した。BODの処理効率は年間を通じ90～95%，CODは60%付近を示し，実験期間を通じて安定した処理ができた。BOD，COD，TN， $\text{NH}_4\text{-N}$ の処理効率の季節変化では気温の低い冬期に低下する傾向がみられ，今後システムの改善の必要があった。人工湿地では高い蒸発散が認められ，水収支から求めた負荷削減率は濃度から求めた除去率より5～7%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。人工湿地における処理効率の評価においては蒸発散の影響を考慮に入れる必要がある。

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) 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.
- 4) 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. Environ. Sci. & Eng., Vol.3, No.3,

- (2014), pp. 142-150.
- 5) 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. Envir.Sci. & Eng.*, Vol 5, No. 9, (2016), pp 440-450.
 - 6) 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 & Ecology Res.*, Vol. 5, No.6, (2017), pp. 427-435.
 - 7) 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.
 - 8) 鈴木大樹, 埋め立て終了後と埋め立て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.
 - 9) 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: 高塩分浸出水を処理する2段式人工湿地の処理効率, 第53回日本水環境学会講演集, (2019), pp. 115
 - 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: 高塩分浸出水を処理する鉛直流伏流式人工湿地の水収支と処理特性 (2), *日本水処理生物学会誌*, 別巻38号, (2018), pp. 55
 - 11) 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: 鉛直流人工湿地におけるヨシの生育の違いが蒸発散と水収支に及ぼす影響, *日本水処理生物学会誌*, 別巻39号, (2019), pp. 28
 - 12) 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: 高塩分浸出水を処理する2段式鉛直流人工湿地の2年間の処理特性, 第54回日本水環境学会講演集, (2020), pp 259.
 - 13) Vymazal, J. and Kropfelva, L.: Denitrification, Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface flow, *Environmental Pollution* 14, Springer, London, (2008), pp 35-41.
 - 14) M. Rozkosny, J. Salec J. and J. Salec: Water Balance of the Constructed Wetlands-A Study of the Macrophytes Evapotranspiration, *Proceeding of 10th International Conference on Wetland Systems for Pollution Control*, Lisbon, Portugal, (2006), pp. 123-129.
 - 15) Mulamoottil G., McBean E. A., Rovers F., editor.: *Constructed Wetlands for the Landfill Leachate*, Leis Publishers, London (2009), pp. 205-222.
 - 16) Kadlec R.M., Knight R. L., Vymazal J., Brix H., Cooper R., and Harberl R.: *Constructed Wetlands for Pollution Control, Processes, Performance, Design and Operation*, *Scientific and Technical Report No.8*, IWA Publishing London, UK, (2010), pp. 41-54.