

2022 年度湖南浄化センターでのロハスの花壇の実証試験に関する報告書

日本大学工学部土木工学科 教授 中野 和典

1. はじめに

人工湿地は自然の水質浄化性能を人工的に強化した半自然的な汚水処理システムである。汚水の有機物は人工湿地のろ床に浸透する過程で、ろ材によるろ過作用や吸着作用によりろ床内に濃縮され、微生物によって時間をかけて分解される。そのようなろ床を花壇として活用し、緑化による多機能性を積極的に利用する人工湿地をロハスの花壇と呼んでいる¹⁾。本研究グループは、郡山市との下水道事業に関する連携協定のもと、パイロットスケールのロハスの花壇を湖南浄化センターに設置し、下水浄化性能を検証してきた^{2,3)}。

2017年8月からの17か月間の下水の試験処理では、ロハスの花壇の3段のろ床の水理条件をすべて好気処理に有利な鉛直流に統一して下水処理を実施した結果、嫌気処理が不十分となった^{2,3)}。そこで2019年6月からの14か月間の下水の試験処理では、3段目のろ床の水理条件を水平流に変更し、嫌気処理を強化したハイブリッドシステムによる下水処理を試みたが、嫌気処理が改善された一方で好気処理性能は低下した^{2,3)}。こ

れらの結果は、好気条件のろ床と嫌気条件のろ床を組み合わせる従来のハイブリッドシステムの限界を示唆している。

そのような経緯を経て2021年7月から2022年7月までの13か月は、好気処理と嫌気処理の双方を強化する新たな試みとして、ひとつのろ床内に好気的な干満流と嫌気的な水平流の双方を導入したハイブリッドろ床を2段目及び3段目のろ床に導入して下水浄化性能を検証し、従来のハイブリッド条件での下水浄化性能と比較評価した。

2. 実証試験の方法

2.1 ロハスの花壇の概要

本研究で調査対象としたパイロットスケールのロハスの花壇の航空写真を図-1に示す。ロハスの花壇は最初沈殿池前の未処理の生下水を受け入れ、1段目ろ床において固液分離が行われ、2段目及び3段目ろ床で水質を改善する仕組みである。2段目及び3段目ろ床は、それぞれろ材や構造が異なる4区画(A~D区)及び3区画(A~C

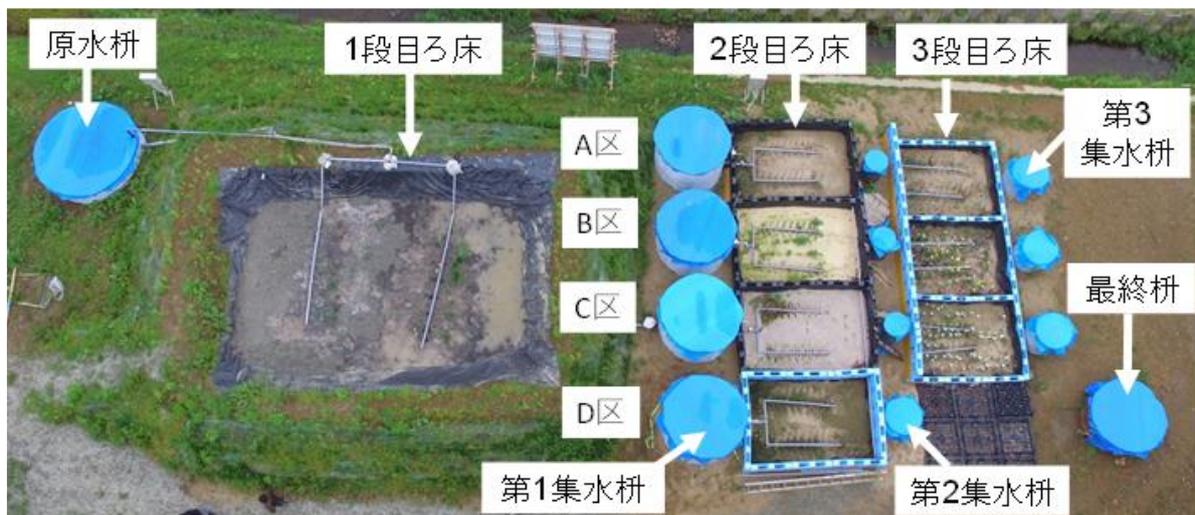


図1 湖南浄化センターの敷地内に設置した3段のろ床で構成されるパイロットスケールのロハスの花壇の全体像

区)で構成され、ろ材やろ床構造が下水浄化性能に及ぼす影響を比較検証する試験区となっている。2 段目及び3 段目のろ床厚が 0.6 m であるの対し、固液分離を主目的とする 1 段目のろ床厚は 0.2 m となっている。1 段目ろ床のろ材は礫である。2 段目及び3 段目ろ床のろ材は A~C 区で異なっており、本報告書で下水浄化性能を報告する B 区の 2 段目のろ材は、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) の吸着性能に実績のあるゼオライト資材 (ゼオフィル, 新東北化学工業株式会社, 塩基置換容量 120-150 meq/100g) と砂を 1:1 の割合で混合したものである^{2,3)}。同じく本報告書で下水浄化性能を報告する C 区の 2 段目のろ材は、B 区と同じゼオライト資材にリン除去性能が期待できるケイ酸カルシウム資材 (イネニカ, クリオン株式会社, Ca 含量 25 wt%) を 1:1 の割合で混合したものを使用した^{2,3)}。B 区及び C 区の 3 段目はともに再生活性炭 (エバダイヤ LG-10R, 水 ing 株式会社) と砂を 1:1 の割合で混合したものである^{2,3)}。

2.2 ロハスの花壇の運転条件

ロハスの花壇への生下水の流入を 2017 年 8 月に開始し、2018 年 12 月までは 1 段目から 3 段目までのすべてのろ床内の水位を制御しない鉛直流条件で下水処理を行った^{2,3)}。次いで 2019 年 6 月から 2020 年 7 月までの 14 か月は、第 3 集水枡内の処理水出口を 0.5 m 立ち上げて 3 段目ろ床内の水位を 0.5 m 高めた水平流条件とし、2 段目の鉛直流条件と組み合わせた従来のハイブリッド条件での下水浄化性能を検証した^{2,3)}。2021 年 7 月から 2022 年 7 月までの 13 か月は、2 段目と 3 段目のろ床の上半分を干満流に、下半分を部分飽和としたハイブリッドろ床による下水浄化性能を検証し、従来のハイブリッド条件での下水浄化性能と比較評価した。

2021 年 7 月以降のハイブリッドろ床を導入したロハスの花壇の運用手順を以下に述べる。原水枡に集められた生下水を 1 日に 4 回 (2 時, 8 時, 14 時, 20 時)、タイマー制御した揚水ポンプにより 1 回あたり 15 分間、1 段目ろ床に送水した。

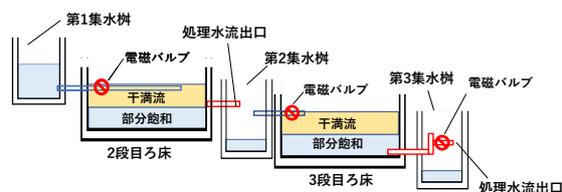


図2 2段目及び3段目ろ床と前後の集水枡の構造の概要

1 日あたりの生下水の送水量の平均値は 9.4 m³ であり、これは従来のハイブリッド条件での送水量と同じである^{2,3)}。1 段目ろ床の処理水を 4 つの第 1 集水枡に均等に集水し、4 区画(A~D 区)に分かれた 2 段目ろ床に流入させた。2 段目及び 3 段目ろ床と前後の集水枡の構造の概要を図 2 に示す。第 2 集水枡出口及び 3 段目ろ床の処理水出口を 0.3 m 立ち上げることで、2 段目及び 3 段目ろ床の下半分が常に飽和状態となる部分飽和とした。第 1 集水枡出口の電磁バルブの開閉をタイマー制御することで、生下水が 1 段目ろ床に流入してから 1 時間後に処理水が 2 段目ろ床へ流入するようにした。流入後の 2 段目ろ床内の満水位は、ろ床表層からマイナス 0.05 m 前後であった。同様に第 2 集水枡の出口の電磁バルブの開閉をタイマー制御し、2 段目ろ床への流入から 2 時間後に 2 段目処理水が 3 段目ろ床へ流入するようにした。流入後の 3 段目ろ床内の満水位は、ろ床表層からマイナス 0.05 m 前後であった。3 段目ろ床流出口の電磁バルブは、2 段目処理水が 3 段目ろ床に流入してから 2 時間後に開放となるようにタイマー制御した。これらの一連の動作により、2 段目及び 3 段目のろ床の上半分において、2 時間の飽和状態 (満水) の後に 4 時間の不飽和状態 (干水) となる干満流が 6 時間毎に適用されるようにした。

3. 実証試験の結果と考察

3.1 BOD 除去性能に対する効果

ロハスの花壇の 2 段目と 3 段目のろ床の上半分を干満流に、下半分を部分飽和としたハイブリッドろ床を導入した条件で下水の試験処理を実施した 2021 年 7 月から 2022 年 7 月までの 13 か月間の B 区及び C 区の下水浄化性能の変遷を

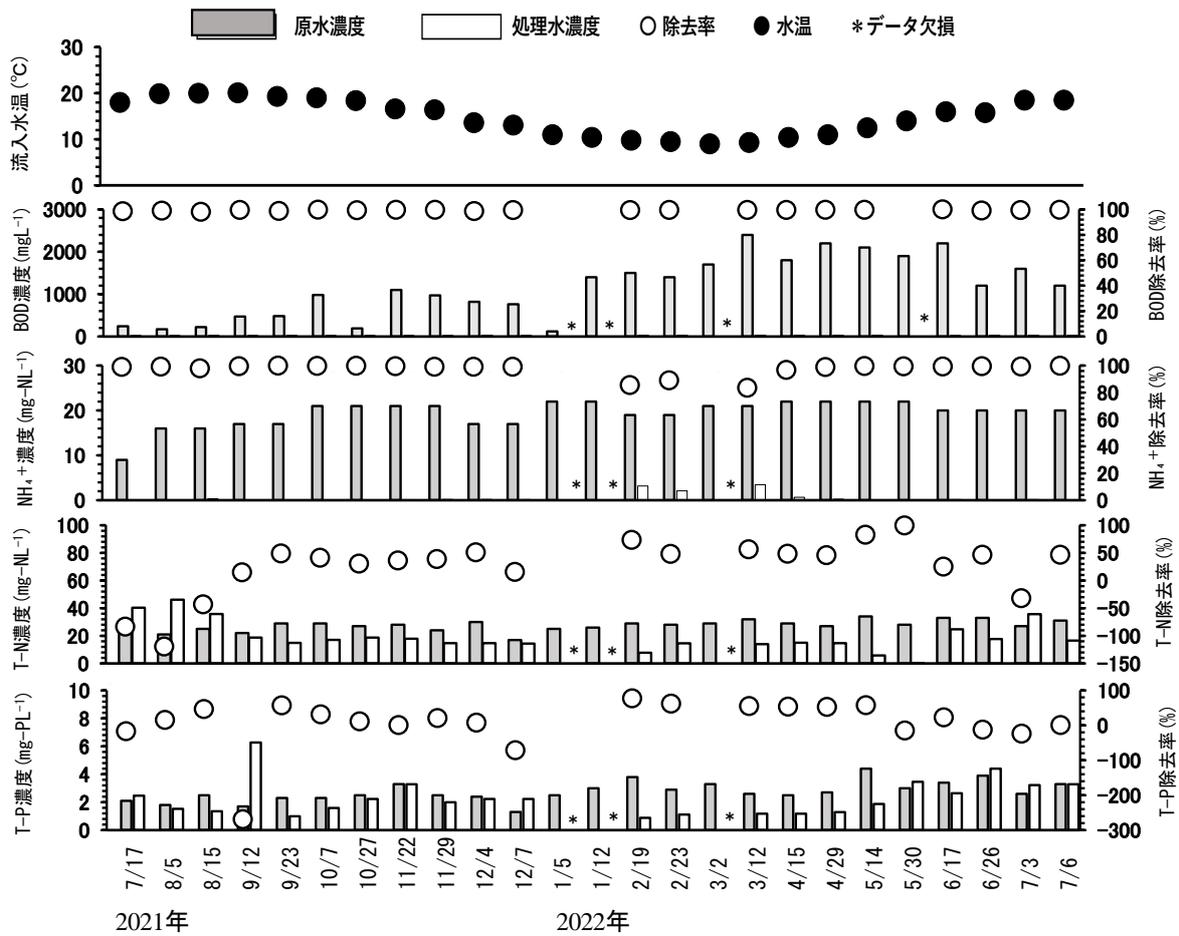


図3 ハイブリッドろ床を導入した条件でのB区における13か月間の下水浄化性能の変遷

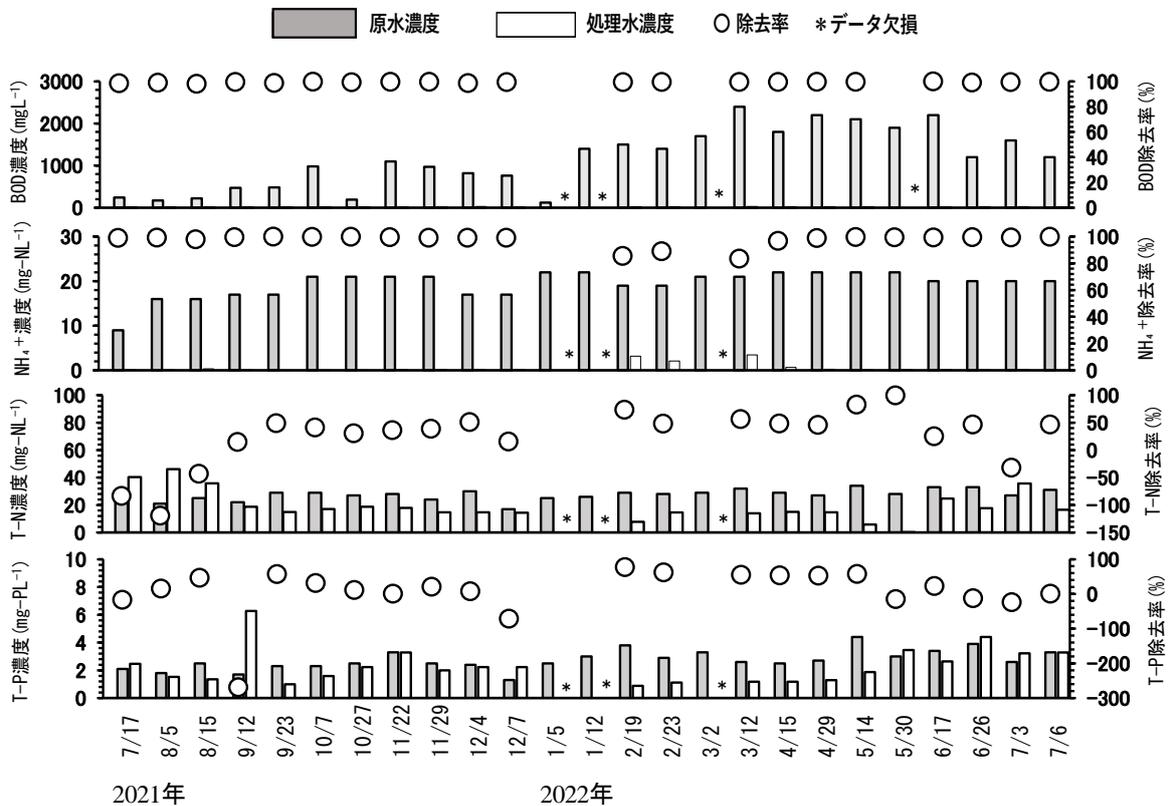


図4 ハイブリッドろ床を導入した条件でのC区における13か月間の下水浄化性能の変遷

表 1 従来のハイブリッド条件で得られた下水浄化性能とひとつのろ床内に干満流と水平流を導入したハイブリッドろ床で得られた下水浄化性能の比較

		B区				C区			
		従来のハイブリッド条件 ²⁾		ハイブリッドろ床		従来のハイブリッド条件 ²⁾		ハイブリッドろ床	
		平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)
BOD	原水濃度(mg L ⁻¹)	100.9	27.0	1165	700.8	100.9	27.0	1165	700.8
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	13.5	9.5	5.7**	3.4	12.4	7.2	4.2**	2.9
	除去率(%)*	86.7		99.3	0.5	87.7		99.5	0.5
NH ₄ ⁺ -N	原水濃度(mg L ⁻¹)	20.3	3.5	19.8	2.9	20.3	3.5	19.8	2.9
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	0.94	1.4	0.53	1.0	0.40	0.5	0.16	0.4
	除去率(%)*	95.4		97.3		98.2		99.2	
T-N	原水濃度(mg L ⁻¹)	29.3	4.4	27.4	4.0	29.3	4.4	27.4	4.0
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	21.0	7.9	19.1	10.9	18.0	7.3	19.0	5.2
	除去率(%)*	28.3		30.3		38.6		30.8	
T-P	原水濃度(mg L ⁻¹)	2.74	0.57	2.74	0.69	2.74	0.57	2.74	0.69
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	2.59	0.94	2.31	1.12	2.10	0.81	1.48	0.97
	除去率(%)*	5.5		15.9		23.3		46.0	

*原水及び処理水濃度の平均値より算出 **従来のハイブリッド条件の有意差あり (P<0.05)

それぞれ図 3 および図 4 に示す。2 段目及び 3 段目のろ床をそれぞれ鉛直流及び水平流とした従来のハイブリッド条件で下水の試験処理を実施した 2019 年 6 月から 2020 年 7 月までの 14 か月間の B 区及び C 区の下水浄化性能との比較を表 1 に示す。従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間の原水の BOD 濃度の平均値 100.9 mg/L に対し、B 区及び C 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 13.5 及び 12.4 mg/L であり、除去率はそれぞれ 86.7 及び 87.7 %であった。一方、ハイブリッドろ床を導入して下水処理を実施した期間の原水の BOD 濃度の平均値は 1165 mg/L であり、従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間の 11 倍以上であった。その原因を湖南浄化センターに問い合わせたところ、新型コロナウイルス感染予防に使用されているアルコール等の消毒剤に起因する可能性が高いとの回答を得た。このような特殊な BOD 負荷条件での下水の試験処理となったが、B 区及び C 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 5.7 及び 4.2 mg/L であり、除去率はそれぞれ 99.3 及び 99.5 %と、ろ材の違いに関わらず両区ともに極めて高い浄化性能が得られた。従来のハイブリッド条件で得られた処理水濃度とハイブリッドろ床の導入により得られた処理水濃度間には、どちらの区でも有意な差 (P<0.05) が確認された。BOD 負荷量の極端な増加や経年に伴うろ床の劣化等のネ

ガティブな要因があるにも関わらず、従来のハイブリッド条件よりも良好な BOD 除去性能が得られたことから、ろ床の上半分だけであっても干満流の導入による好気処理の強化は十分であり、高い酸素供給速度が得られる干満流を組み合わせたハイブリッドろ床の優位性を確認することができた。

3.2 NH₄⁺-N 除去性能の評価

従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間の原水の NH₄⁺-N 濃度の平均値 20.3 mg-N/L に対し、B 区及び C 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 0.94 及び 0.40 mg-N/L であり、除去率はそれぞれ 95.4 及び 98.2 %であった (表 1)。一方、ハイブリッドろ床を導入して下水処理を実施した期間の原水の NH₄⁺-N 濃度の平均値は 19.8 mg-N/L であり、BOD とは異なり、従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間と同等の濃度であった。B 区及び C 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 0.53 及び 0.16 mg-N/L であり、除去率はそれぞれ 97.3 及び 99.2 %であった。ハイブリッドろ床の導入により両区ともに従来のハイブリッド条件よりも高い NH₄⁺-N 除去率を得ることができたが、両区ともに処理水濃度間に有意差はなかった (P>0.05)。

3.3 T-N 除去性能の評価

従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間の原水の T-N 濃度の平均値 29.3 mg-N/L に

対し、B区及びC区の処理水濃度の平均値はそれぞれ21.0及び18.0 mg-N/Lであり、除去率はそれぞれ28.3及び38.6%であった(表1)。一方、ハイブリッドろ床を導入した条件では、原水のT-N濃度の平均値27.4 mg-N/Lに対し、B区及びC区の処理水濃度の平均値はそれぞれ19.1及び19.0 mg-N/Lであり、除去率はそれぞれ30.3及び30.8%であった。従来のハイブリッド条件と比較して、B区では同等の除去率が得られたのに対し、C区では除去率が低下する結果となり、ひとつのろ床内で好気処理と嫌気処理の双方の強化を図ったハイブリッドろ床によってT-N除去性能を改善することはできなかった。

図5にB区及びC区の3段目流出水中の窒素成分の内訳を示す。両区ともNO₃⁻-Nが大部分を占めていることから、好氣的な干満流条件により硝化が著しく進行していたことが明らかであった。水相よりも固相のNH₄⁺-Nが優先的に硝化され、NO₃⁻-Nが水相に遊離する現象が報告されており⁴⁾、ろ材に吸着したNH₄⁺-Nが優先的に硝化され、NO₃⁻-Nとなって水相に遊離し、処理水のT-N濃度が流入濃度を上回る現象が起きていたことが推察された。このようにろ材に吸着されたNH₄⁺-Nの硝化が促進され、NO₃⁻-Nとなってろ材から遊離することによりろ材のNH₄⁺-N吸着サイトが再生されることは、既往の人工湿地の研究においても報告されており⁵⁾、NH₄⁺-N除去性能が持続する機構として重要である。

一方、NO₃⁻-Nとして窒素成分が残留していたことから、2段目及び3段目ろ床の下半分に部分飽和を導入しても、依然として脱窒が制限となつてT-N除去性能が低レベルに留まっていることが明らかとなった。B区・C区ともに2段目及び

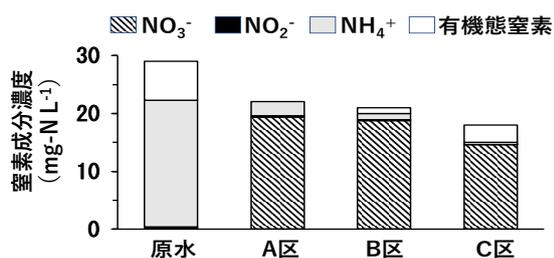


図5 A-C区の従来のハイブリッド条件での最終処理水の窒素成分の比較

3段目ろ床への流入水のBOD/N比は、それぞれ3.1及び1未満であったことから、嫌気処理に適したハイブリッドろ床下部の飽和帯に至る前に脱窒に必要な有機物が除去され、有機物不足により脱窒が制限されたことが推察された。T-N除去性能の改善には、その点を踏まえた新たな工夫が必要であり、今後の課題である。

3.4 T-P除去性能の評価

従来のハイブリッド条件で下水処理を実施した期間の原水のT-P濃度の平均値2.74 mg-P/Lに対し、B区及びC区の処理水濃度の平均値はそれぞれ2.59及び2.10 mg-P/Lであり、除去率はそれぞれ5.5及び23.3%であった(表1)。一方、ハイブリッドろ床を導入した条件では、原水のT-P濃度の平均値2.74 mg-P/Lに対し、B区及びC区の処理水濃度の平均値はそれぞれ2.31及び1.48 mg-P/Lであり、除去率はそれぞれ15.9及び46.0%であった。このように従来のハイブリッド条件と比較して両区ともにT-P除去率を大きく改善できたが、両区ともに処理水濃度間に有意差はなかった(P>0.05)。

3.5 除去原単位の評価

ロハスの花壇の2段目と3段目のろ床にハイブリッドろ床を導入した条件で下水の試験処理を実施した2021年7月から2022年7月までの13か月間の原水濃度、最終処理水濃度及び流入水量の平均値から求めたBOD除去原単位は、B区及びC区でそれぞれ102.8及び102.9 g-BOD/m²dとなり、従来のハイブリッド条件で得られたBOD除去原単位(7.75及び7.85 g-BOD/m²d)と比較して非常に高い値となった²⁾。これは原水のBOD濃度が通常の11倍以上であったことによるものであるが、高い酸素供給速度が期待できる干満流を組み合わせたハイブリッドろ床によって、BOD負荷の急激な増加に関わらず極めて高い除去率が維持できていたことも要因であり、人工湿地のロバストネスが発揮された結果といえる。

ろ材の種類に関わらず97%以上の高い除去率が得られたNH₄⁺-Nの除去原単位が、B区及びC区でそれぞれ1.67及び1.71 g-N/m²dであった

のに対し、T-N 除去原単位はそれぞれ 0.74 及び 0.75 g-N/m² d であり、T-N 除去単位の改善が課題として残された。本研究ではハイブリッドろ床における干満流と部分飽和の比率を 1:1 としたが、ろ床の下半分の部分飽和での脱窒に必要な有機物不足が T-N 除去単位の低さの原因であるとするれば、干満流の比率を小さくすることで T-N 除去単位の改善できる可能性がある。干満流の比率を縮小することで部分飽和の比率は拡大するため、好氣的な有機物分解が抑制されて有機物不足が解消されるだけでなく、部分飽和までの深さが短縮されることで脱窒に適した飽和帯に有機物が届きやすくなる。その反面、極めて良好であった BOD 除去性能が低下する可能性もあり、総合的な視点でハイブリッドろ床における干満流と部分飽和の比率を最適化する必要がある。

リン除去原単位は、B 区及び C 区でそれぞれ 0.04 及び 0.11 g-P/m² d となり、従来のハイブリッド条件での除去原単位 (0.01 及び 0.06 g-P/m² d) を大きく改善することができた。常温常圧下でガス化しないリンは、ロハスの花壇のろ床に蓄積し続ける。本研究で調査対象としたロハスの花壇には、2017 年 8 月の下水の試験処理の開始以降の 5 年間に除去されたリンが蓄積しており、ろ床からのリンの溶出を抑制することがリン除去原単位の維持に重要である。本研究では、干満流を組み合わせたハイブリッドろ床を導入することで、従来のハイブリッド条件と比してリン除去原単位を改善することができたが、この値を中長期的に維持できるか否かを確認するための調査が必要であり、引き続き下水の試験処理を継続する予定である。

4. まとめ

本研究では、ひとつのろ床内で好気処理と嫌気処理の双方を強化する新たなハイブリッドシステムとして、パイロットスケールのロハスの花壇の 2 段目及び 3 段目ろ床の上半分に干満流を、下半分に部分飽和を適用したハイブリッドろ床を導入し、下水浄化性能を検証した。得られた知見

を以下にまとめた。

1) 干満流と部分飽和を組み合わせたハイブリッドろ床では、従来のハイブリッド条件よりも良好な BOD 除去性能を得ることが可能であり、ハイブリッドろ床を導入した多段人工湿地による下水処理において、99 %以上の極めて高い BOD 除去率が達成できた。

2) ロハスの花壇に干満流を組み合わせたハイブリッドろ床を導入することで処理水の BOD 濃度の平均値を 4.2 mg/L まで低下させることができた。

3) 干満流を組み合わせたハイブリッドろ床を導入したロハスの花壇により 102.9 g-BOD/m² d の BOD 除去原単位を達成できた。

4) 干満流と部分飽和を組み合わせたハイブリッドろ床では、従来のハイブリッド条件よりも良好な NH₄⁺-N 除去性能を得ることが可能であり、99 %以上の極めて高い NH₄⁺-N 除去率が達成できた。

5) 干満流と部分飽和を組み合わせたハイブリッドろ床では、従来のハイブリッド条件よりも良好な T-N 除去性能を得ることはできなかった。

6) T-N 除去性能を改善できなかった要因は、ろ床下部の飽和帯で脱窒に必要な有機物が不足しているためと考えられ、干満流と部分飽和の比率を調整する等の対策により、有機物不足を解消することが今後の課題である。

7) 干満流を導入したハイブリッドろ床では、従来のハイブリッド条件よりも良好な T-P 除去性能を得ることが可能であり、ろ材としてゼオライトとケイ酸カルシウムを組み合わせたハイブリッドろ床では 46 %の T-P 除去率を達成できた。

参考文献

- 1) 中野和典, 大附遼太郎, 中村和徳, 橋本 純, 2015. 人工湿地を活用した生活排水の高度処理, 用水と廃水, 57(11), 835-843.
- 2) 鈴木援, 谷口崇至, 中野和典, 2021. ろ床の重層化が多段型人工湿地の下水浄化性能に及ぼす影響, 水環境学会誌, 44(4), 85-93.

- 3) 中野和典, 鈴木援, 谷口崇至, 2021. 機能性ろ材が多段型人工湿地の下水浄化性能に及ぼす効果, 土木学会論文集 G (環境), 77(7), III-61-III-69.
- 4) 桑原智之, 田中幸男, 相崎守弘, 2003. ゼオライト水耕法における付着微生物の硝化によるアンモニア吸着ゼオライトの再生. 水環境学会誌 26(6), 375-380.
- 5) Silveria, D.D., Filho, P.B., Philippi, L.S., Kim, B., Molle, P., 2015. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. *Ecological Engineering* 77, 257-264.