

2021 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污水处理システムである。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10月からの20か月は水理条件を鉛直流に統一して下水処理を実施したが、嫌気処理が不十分であった^{2,3)}。そこで2019年6月からの14か月は3段目のろ床を水平流に変更し、嫌気処理を強化したハイブリッド条件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)}。

そのような経緯を経て2021年度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、下水浄化性能の改善効果を検証した。

2. 実証試験の方法

2.1 人工湿地の概要

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。3段のろ床により下水が浄化処理される仕組みとなっており、1日の下水処理水量は約9.4m³である。1段目のろ床は共通であり、2段目以降のろ床がA~D区の4つに分かれている。A~D区におけるろ材の組み合わせを表-1に示す。共通である1段目のろ材は礫である。A区のろ材は2020年度ま

では2段目、3段目ともろ過砂であったが、2021年6月にろ材をゼオライトに変更する工事を実施した。B区のろ材は2段目がゼオライトとろ過砂、3段目はろ過砂と活性炭、C区のろ材は、2段目はケイ酸カルシウムとゼオライト、3段目はろ過砂と活性炭の組み合わせである。本人工湿地で使用したろ過砂は浄水場で使用されていたものである。D区は占有面積がA~C区の半分である重層型ろ床であり、3段目のろ床は2段目の地下にある。通気層をろ床内に導入することで地表面積に依存せず重層的に好気的なろ床を創出し、単独ろ床で多段ろ床と同様な処理能力を達成することを試みている。D区のろ材はA区と同様に2020年度までは2段目、3段目ともろ過砂であったが、2021年6月にろ材をゼオライトに変更する工事を実施した。

A~D区の2段目及び3段目ろ床の上半分に干満流を、ろ床の下半分に水平流を適用した下水の試験処理を2021年7月から開始し、干満流と水平流の双方を導入したロハスの花壇の下水浄化性能を評価した。

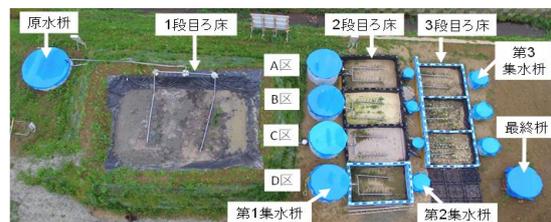


図-1 本研究で調査対象としたロハスの花壇の航空写真

表-1 多段型ロハスの花壇のろ床の構成

段	区間	ろ材	ろ材粒径(mm)	ろ床厚さ(mm)	ろ床面積(m ²)
1	共通	礫	5~10	200	36
	A区	ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75
	B区	砂	3>	600	8.75
2		ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75
	C区	ケイ酸カルシウム	2>	600	8.75
		ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75
	D区	ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75
3	A区	ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75
	B区	砂	3>	600	8.75
		活性炭	0.5>1.4	600	8.75
	C区	砂	3>	600	8.75
		活性炭	0.5>1.4	600	8.75
	D区*	ゼオライト	1.0>1.4	600	8.75

*50mmの空気層を隔て2段目ろ床の地下に設置

2.2 試験方法

A~D 区の 3 段目ろ床からの流出水を毎月 1~3 回採水し、BOD、全窒素(TN)、アンモニア態窒素(NH₄⁺-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、全リン(TP)濃度を測定して、A~D 区の下水浄化性能を明らかにした。

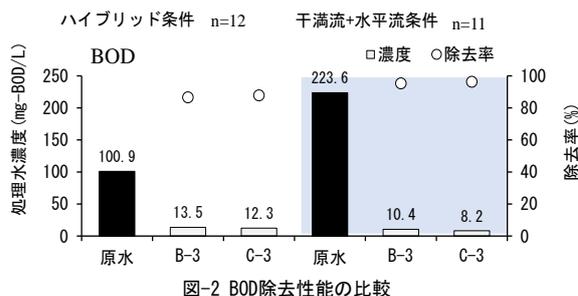
本報告書では、ろ材の交換を行っていない B 区と C 区で得られた 2021 年 7 月から 6 か月間の下水浄化性能を速報し、ひとつのろ床内に好氣的な干満流と嫌氣的な水平流を導入した効果の相対的評価として 2019 年 6 月からの 14 か月間のハイブリッド条件で得られた下水浄化性能と比較した結果を報告する。

3. 実証試験の結果と考察

3.1 BOD 除去性能に対する効果

ひとつのろ床内に干満流と水平流を導入して得られた BOD 除去性能をハイブリッド条件での BOD 除去性能と比較した結果を図-2 に示す。2 段目のろ材がゼオライトとろ過砂、3 段目のろ材がろ過砂と活性炭の組み合わせである B 区での結果に着目すると、ハイブリッド条件での 14 か月間の原水の BOD 濃度の平均値 100.9mg/L に対し、B 区の処理水の BOD 濃度の平均値は 13.5mg/L であり、除去率は 86.0%であった。一方、6 か月間の干満流と水平流を導入した条件では、原水の BOD 濃度の平均値 223.6mg/L に対し、B 区の処理水の BOD 濃度の平均値は 10.4mg/L であり、除去率は 95.3%であった。干満流と水平流を導入した試験期間の原水の平均濃度がハイブリッド条件での試験期間の倍であったにもかかわらず、処理水濃度は低減しており、干満流と水平流の導入による除去率の改善は顕著であった。

2 段目のろ材がケイ酸カルシウムとゼオライト、3 段目のろ材がろ過砂と活性炭の組み合わせである C 区では、ハイブリッド条件での 14 か月間の処理水の BOD 濃度の平均値は 12.3mg/L であり、除去率は 87.1%であった。干満流と水平流を導入した 6 か月間の処理水の BOD 濃度の平均値は 8.2mg/L であり、除去率は 96.3%であったこ

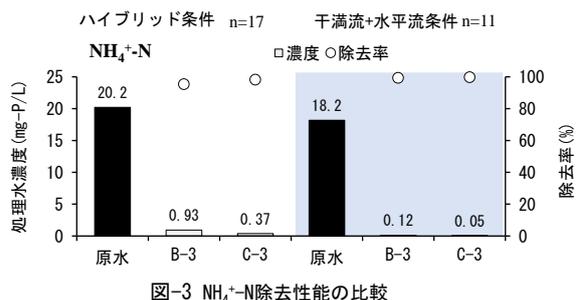


とから、除去率の改善は顕著であった。

このように組み合わせたろ材の違いに関わらず C 区でも B 区と同様に処理水濃度の低下は顕著であり、干満流と水平流の導入が BOD 除去性能の改善に非常に効果的であったことを示唆するデータを得ることができた。しかし、両区とも干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間において、統計学的有意差は認められなかった (T 検定による P 値>0.05)。その原因として、干満流と水平流を導入した期間は 6 か月間と短く、データ数(n=11)が十分でないことが考えられるため、さらに 6 か月間程度のデータを確保し、効果を確認する必要がある。

3.2 NH₄⁺-N 除去性能に対する効果

B 区での結果 (図-3) に着目すると、ハイブリッド条件での 14 か月間の原水の NH₄⁺-N 濃度の平均値 20.2mg-N/L に対し B 区の処理水濃度の平均値は 0.93mg-N/L であり、除去率は 95.4%であった。一方、干満流と水平流を導入した 6 か月間の原水の NH₄⁺-N 濃度の平均値 18.2mg-N/L に対し B 区の処理水濃度の平均値は 0.12mg-N/L であり、除去率は 99.3%に達した。この結果により、ハイブリッド条件でも高いレベルであった NH₄⁺-N 除去率が干満流と水平流の導入によりさらに高いレベルに改善されたことが示された。



C区では、ハイブリッド条件での14か月間の処理水濃度の平均値は0.37mg-N/Lであり除去率が98.0%であったのに対し、干満流と水平流を導入した6か月間の処理水濃度の平均値は0.05mg-N/Lであり、除去率は99.7%に改善された。

このように組み合わせたろ材の違いに関わらずC区でもB区と同様に処理水濃度のさらなる低下が確認され、干満流と水平流の導入により極めて高いNH₄⁺-N除去性能を達成できることを示すデータを得ることができた。しかし、両区とも干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間に統計学的有意差は認められなかった(P>0.05)。統計学的に有意な差をP値に反映させるにはデータ数を増やす必要があり、干満流と水平流を導入した条件での下水処理を試験期間が1年間となる2022年7月まで行う予定である。

3.3 全窒素 (T-N) 除去性能に対する効果

T-N 除去性能に着目すると、図-4 に示されるようにハイブリッド条件での14か月間の原水のT-N濃度の平均値29.3mg-N/Lに対し、B区の処理水濃度の平均値は20.9mg-N/Lであり、除去率は28.7%であった。一方、干満流と水平流を導入した6か月間の原水のT-N濃度の平均値26.3mg-N/Lに対し、B区の処理水濃度の平均値は20.2mg-N/Lであり、除去率は23.1%に低下した。干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間に統計学的有意差は認められなかった(P>0.05)が、干満流と水平流を導入してもT-N除去性能の改善には至らなかったことが明らかとなった。

C区では、ハイブリッド条件での14か月間の処理水濃度の平均値は18.0mg-N/Lであり除去率は38.6%であったのに対し、干満流と水平流を導入した6か月間の処理水濃度の平均値は23.6mg-N/Lであり、除去率は38.6%まで減少した。干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間には統計学的有意差が認められ(P<0.05)、干満流と水平流の導入がC区ではマイナスに働き、T-N除去性

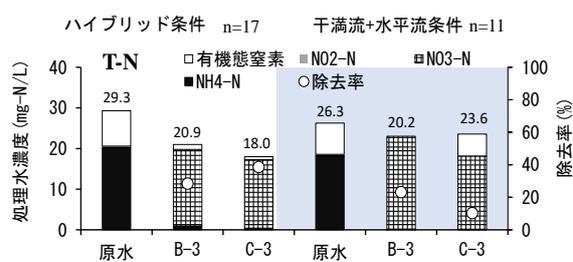


図-4 T-N除去性能の比較

能を低下させたことが明らかとなった。

これらの結果より、ろ材の組み合わせが異なるB区とC区で干満流と水平流の導入による影響が大きく異なることが示されたが、いずれにせよ期待していた嫌気処理の強化を実現するには至らなかった。その原因は、想定した以上に干満流と水平流の導入が好気処理の強化に効果的であったことである。BODとNH₄⁺-Nの除去率は非常に高く、B区、C区ともに有機物不足によって脱窒が抑制される結果となったことが考えられた。両区とも処理水の窒素成分の大部分をNO₃⁻-Nが占めていることから、ろ床内で脱窒が抑制されていたことが明らかである。脱窒を強化するためには、好気処理を適度に抑制して有機物不足を解消することが必要である。

2021年度に導入した干満流と水平流の導入のメリットとして、ろ床内の好気的な空間と嫌気的な空間の比率の調整が可能なが挙げられる。2段目及び3段目ろ床の上半分に干満流、ろ床の下半分に水平流(干満流:水平流=1:1)を適用した結果、好気処理の強化が過大となったことから、改善策として干満流の比率を小さくして好気処理を抑制する手立てが考えられる。干満流と水平流を1:1とした条件での下水処理期間が1年間となる2022年7月以降には、干満流の比率を小さくすることによる嫌気処理の強化を試みる予定である。

3.4 全リン (T-P) 除去性能に対する効果

T-P 除去性能に着目すると、図-5 に示されるようにハイブリッド条件での14か月間の原水のT-P濃度の平均値2.7mg-P/Lに対し、B区の処理水濃度の平均値は2.6mg-P/Lであり、除去率は5.5%であった。一方、干満流と水平流を導入した6か月間の原水のT-P濃度の平均値2.3mg-P/Lに対

し、B 区の処理水濃度の平均値は 2.4mg-P/L であり、除去率は -5.5%に低下した。除去率が負の値となったのは、これまでの下水処理でろ床に蓄積したリンが溶出に転じた結果であると推察された^{4,5)}。干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間に統計学的有意差は認められなかった(P>0.05)が、B 区では干満流と水平流の導入では T-P 除去性能は改善されなかったことが示された。

これに対し C 区では、ハイブリッド条件での 14 か月間の処理水濃度の平均値は 2.1mg-P/L であり除去率は 23.3%であったのに対し、干満流と水平流を導入した 6 か月間の処理水濃度の平均値は 1.2mg-P/L であり、除去率は 46.8%にまで改善され、干満流と水平流を導入した期間とハイブリッド条件で下水処理を行った期間の処理水濃度間には統計学的有意差が認められた(P<0.05)。

このようにろ材の組み合わせが異なる B 区と C 区で干満流と水平流の導入による影響が大きく異なることが示されたが、特に C 区での T-P 除去性能の改善は顕著であった。C 区の特徴は 2 段目のろ材にリン除去への効果が期待されるケイ酸カルシウムが用いられていることである。ハイブリッド条件でも B 区と C 区間においてリン除去性能に明らかな差異が認められていたが、干満流と水平流の導入により B 区と C 区間のリン除去性能に圧倒的な差異が生じた。この結果より、干満流と水平流の導入がケイ酸カルシウムのリン除去機能の発揮に非常に有効に働くことが明らかとなった。

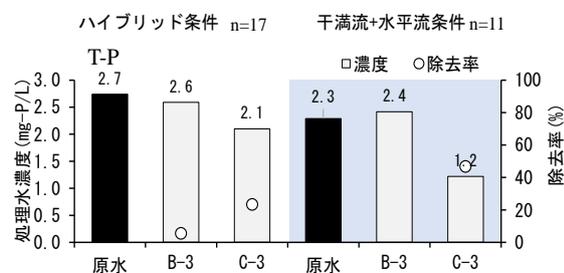


図-5 T-P除去性能の比較

4. 実証試験のまとめ

2021 年度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氣的

な干満流と嫌氣的な水平流の双方を導入し、得られた下水浄化性能を 2019 年 6 月からの 14 か月間のハイブリッド条件で得られた下水浄化性能と比較評価した結果、以下の知見を蓄積することができた。

- 干満流と水平流の導入は BOD 除去性能の改善に非常に効果的であり、ろ材の組み合わせに関わらずハイブリッド条件での BOD 除去性能を上回っただけでなく、2017 年 10 月からの 20 か月間の鉛直流条件での BOD 除去性能をも上回った。干満流と水平流の導入は無曝気で高い BOD 除去性能を達成する手段として極めて有効である。
- 干満流と水平流の導入は硝化性能の改善にも非常に効果的であり、BOD 除去性能と同様にろ材の組み合わせに関わらずハイブリッド条件での BOD 除去性能を上回っただけでなく、鉛直流条件での硝化性能をも上回った。干満流と水平流の導入は無曝気で高い硝化性能を達成する手段としても極めて有効である。
- 干満流と水平流の導入で得られる高い BOD 除去性能は脱窒に必要な有機物不足を生み出し、脱窒が抑制された。脱窒性能を改善するには好気処理を適度に抑制して有機物不足を解消することが必要であり、今後の実証試験においては、好氣的な干満流の比率を小さくすることによる嫌気処理の強化が望まれる。
- 干満流と水平流の導入は、ろ材に用いたケイ酸カルシウムのリン除去性能の発揮に非常に効果的であり、ハイブリッド条件を大きく上回るリン除去を行うことができた。干満流と水平流の導入は、経年によりろ床内に蓄積するリンの溶出を抑制する手段としても有効である可能性がある。

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) Vymazal, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, Science of the Total Environment 380(1-3), 48-65.
- 5) Haritash, A.K., Dutta, S., Sharma, A., 2017. Phosphate uptake and translocation in a tropical Canna-based constructed wetland, Ecological Processes 6:12.