

2020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

住民一人あたりの行政コストは人口規模が小さいほど増大し、人口減少社会においては下水道等の社会インフラの持続が困難になることが懸念されており、従来の手法に捉われない費用対効果の大きい汚水処理手法への転換が望まれる。

余剰汚泥の発生が少なく無曝気で汚水処理が行える人工湿地は、高い水質浄化能力を有しており、費用対効果、エネルギー対効果の双方で優れていることから、持続可能な低炭素・循環型社会の実現に貢献する有効な汚水処理システムとなることが期待できる。

しかし、処理可能な水量は人工湿地の面積に依存するため、国土が狭く、用地確保が難しい我が国において従来の人工湿地（多段型）を普及させることは困難であった。

そこで本実証試験では、ろ床の重層化によって省面積化を実現したパイロットスケールの重層型人工湿地を下水処理場に設置し、その下水処理性能を従来の多段型人工湿地と比較した²⁾。2018年度から2019年度にかけての15か月間は水理条件を鉛直流に統一した場合の下水浄化性能を比較した。次いで2019年度から2020年度にかけての14か月間は水理条件を鉛直流と水平流を組み合わせたハイブリッド条件にして下水浄化性能を比較し、ろ床の重層化の影響をハイブリッド条件下で評価した。

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人工湿地の航空写真を図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2段目、3段目ともろ過砂であり、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



図-1 調査対象とした人工湿地の航空写真

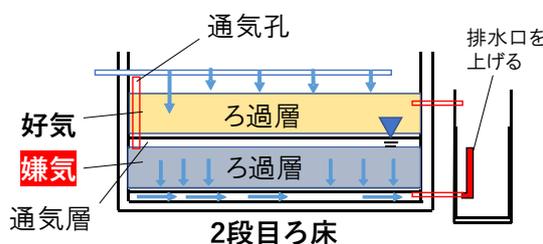


図-2 重層型人工湿地の構造

表-1 機能性ろ材の組み合わせ

ろ床	ろ材	ろ材粒径 (mm)	ろ材厚 (mm)		
1段目	共通	5~10	200		
2段目	A区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	ろ過砂	3>	300
	B区	上層	ゼオライト	1~4	300
		下層	ろ過砂	3>	300
	C区	上層	ケイ酸カルシウム	0~4	300
		下層	ゼオライト	1~4	300
	D区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	ろ過砂	3>	300
3段目	A区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	ろ過砂	3>	300
	B区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	活性炭	0.5~1.4	300
	C区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	活性炭	0.5~1.4	300
	D区	上層	ろ過砂	3>	300
		下層	ろ過砂	3>	300

ていたものである。D区は占有面積が多段型人工湿地の半分である重層型人工湿地であり、3段目のろ床は2段目の地下にある。重層型人工湿地の構造を図2に示す。重層型人工湿地は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氣的なろ床を創出し、単独の湿地の面積で多段処理と同様な処理能力を達成しようとするコンパクトな人工湿地である³⁾。D区のろ材はA区と同様に2段目、3段目ともろ過砂である。

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。

本稿ではデータの公表が可能なA区とD区で得られたデータを比較することにより、重層型人工湿地の下水処理性能を従来の多段型人工湿地と比較評価した結果を報告する。

3. 実証試験の結果と考察

3.1 鉛直流条件での多段型と重層型人工湿地の浄化性能の比較

鉛直流条件で下水処理を実施した2017年10月から2018年12月までの15カ月間のA区及びD

区の下水浄化性能の変遷をそれぞれ図3及び図4に、両者の下水浄化性能の比較を表2に示す。原水のBOD濃度の平均値94.8mg/Lに対し、A区及

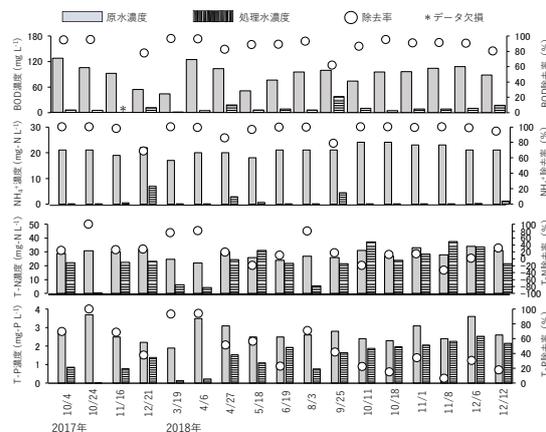


図3 非重層化ろ床で構成された多段型人工湿地の鉛直流条件での15カ月間の下水浄化性能の変遷

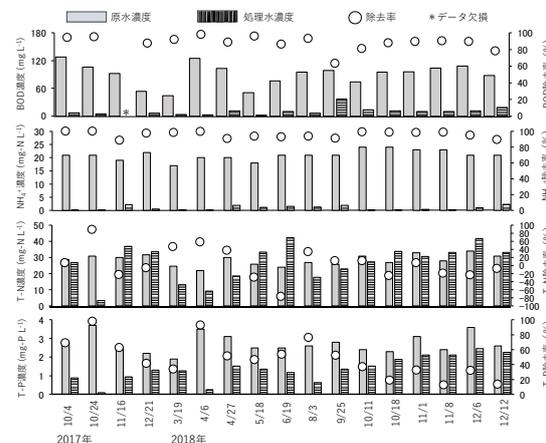


図4 重層化ろ床で構成された多段型人工湿地の鉛直流条件での15カ月間の下水浄化性能の変遷

表2 鉛直流条件での15カ月間のA区（非重層化ろ床）とD区（重層化ろ床）の下水浄化性能の比較

		非重層化ろ床				重層化ろ床			
		全期間		最後の3カ月間		全期間		最後の3カ月間	
		平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)
BOD	原水濃度(mg L ⁻¹)	94.8	25.6	94.2	11.1	94.8	25.6	94.2	11.1
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	9.4	8.3	9.2	2.9	9.5	7.9	11.5	1.5
	除去率(%)*	90.1		90.2		90.0		87.8	
NH ₄ ⁺ -N	原水濃度(mg L ⁻¹)	20.9	1.9	22.7	1.2	20.9	1.9	22.7	1.2
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	1.1	1.9	0.3	0.4	0.9	0.8	0.8	0.7
	除去率(%)*	94.9		98.5		95.6		96.6	
T-N	原水濃度(mg L ⁻¹)	28.8	3.5	30.7	2.5	28.8	3.5	30.7	2.5
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	21.5**	11.0	30.4	6.2	26.9**	10.9	33.3	4.4
	除去率(%)*	25.3		1.0		6.6		-8.5	
T-P	原水濃度(mg L ⁻¹)	2.65	0.48	2.73	0.47	2.65	0.48	2.73	0.47
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	1.37	0.76	2.14	0.21	1.36	0.65	2.06	0.30
	除去率(%)*	48.3		21.6		48.7		24.5	

*原水及び処理水濃度の平均値より算出 **非重層化ろ床と重層化ろ床間に有意差あり (P<0.05)

び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 9.4 及び 9.5mg/L であり，除去率はそれぞれ 90.1 及び 90.0%であった。

一方，原水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の平均濃度は 20.9mg-N/L であり，A 区及び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 1.1 及び 0.9mg-N/L であったことから， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の除去率はそれぞれ 94.9 及び 95.6%と高いレベルであった。両者の 15 か月間の処理水の BOD 及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度に有意な差は無く ($P>0.05$)，重層化ろ床の D 区において非重層化ろ床である A 区と同等の好気処理性能が得られたことから，鉛直流条件下では，空気層の導入により地下に確保したろ床が通常の上のろ床と同様に機能し，地上のろ床と同等の好気処理性能が得られることを確認することができた。

T-N に着目すると，原水の平均濃度 28.8mg-N/L に対し，A 区及び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 21.5 及び 26.9mg-N/L であり，除去率はそれぞれ 25.3 及び 6.6%と， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の除去率と比較して明らかに低いレベルであっただけでなく，T 検定により重層化ろ床と非重層化ろ床間で有意な差が確認された ($P<0.05$)。

図 5 に A 区及び D 区の処理水中の窒素成分の内訳の平均値を示す。A 区及び D 区のどちらの処理水でも $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が大部分を占めていることから，好気的な鉛直流条件のろ床で硝化が著しく進行した反面，脱窒が進まなかったことが示された。図 3 及び図 4 の除去性能の変遷をみると，A 区では 17 サンプルのうち 3 サンプルで除去率がマイナスであり，D 区では 18 サンプルのうち 8 サンプルで除去率がマイナスであった。水相よりも固相の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が優先的に硝化され， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が水

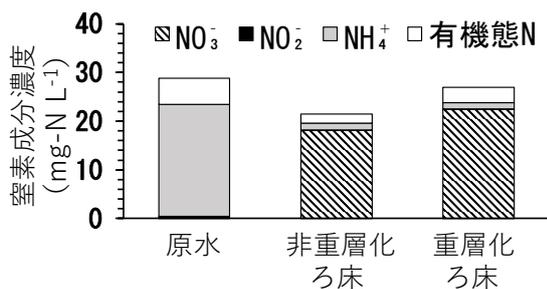


図5 A区（非重層化ろ床）とD区（重層化ろ床）の鉛直流条件下での最終処理水の窒素成分の比較

相に遊離する現象が報告されていることから⁴⁾，ろ材に吸着した $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が硝化され， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 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。

3 段目ろ床が地下にある D 区では，ろ床が地上にある A 区より嫌気的になる可能性があり，A 区よりも脱窒が進行して T-N 除去率は上回ることが期待されたが，D 区の T-N 除去率は A 区を下回る結果となった。BOD 及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の除去性能が同等であったことから，D 区の重層化ろ床は A 区に劣らず十分に好气的であり，期待したように脱窒が進まなかったことが推察された。A 区と D 区の違いとして，A 区では 3 段目ろ床表層に植物があるのに対し，D 区の 3 段目ろ床は地下にあるため植物がないことが挙げられる。植物根から分泌される有機物による脱窒の促進効果や根圏微生物叢の活性化が報告されており^{5,6)}，重層化によって地下にろ床を確保した場合のデメリットとして，このような植物の存在によって促進される脱窒作用が低下することを考慮する必要があることが示された。

T-P に着目すると，原水の T-P 濃度の平均値 2.65mg-P/L に対し，A 区及び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 1.37 及び 1.36mg-P/L と有意な差は無かった ($P>0.05$)。除去率はそれぞれ 48.3 及び 48.7%と同等であり，ろ床を重層化した D 区において，通常の多段ろ床である A 区と同等のリン除去が行えたことが確認できた。この結果より，鉛直流条件下では，空気層の導入により地下に確保したろ床が，通常の上のろ床と同等のリン除去性能を発揮することを確認することができた。

鉛直流条件下で下水処理を開始してから 1 年を経た最後の 3 か月間における原水濃度，最終処理水濃度及び流入水量の平均値より，人工湿地の 1 段目から 3 段目までの占有ろ床面積あたりの水質浄化性能である除去原単位を求めると，従来の多段型人工湿地である A 区の BOD 及び T-P の除去原単位は，それぞれ 7.54g-BOD/m² d 及び

0.052g-P/m²d となった。一方、3 段目ろ床が地下に存在する重層型人工湿地である D 区の BOD 及び T-P の除去原単位は、それぞれ 10.95g-BOD/m²d 及び 0.089g-P/m²d であり、ろ床を重層化したことによる省面積化により D 区の BOD 及び T-P の除去原単位はそれぞれ A 区の 1.5 倍及び 1.7 倍となった。一方、T-N については表-2 に示すように、D 区の最後の 3 か月間における処理水濃度の平均が原水濃度の平均を上回り、除去率がマイナスとなっており、A 区を上回る結果にはならなかった。

無曝気で好氣的な汚水処理が行える人工湿地の省エネルギー性は先行する欧米での事例で数多く報告されている^{7,9)}。本人工湿地による下水処理に要した日平均消費電力(3.03kWh)を用いて処理水量あたりのエネルギー消費量であるエネルギー消費原単位を求めると 0.32 kWh/m³ となった。原油換算でのエネルギー消費原単位では 0.082L/m³ となり、下水処理のエネルギー消費原単位として極めて低いレベルであることが示された。無曝気で好氣的な水処理が行える人工湿地を適用することで、下水の好気処理に要するエネルギー消費の大幅な削減が可能であり、下水道事業の脱炭素化に大きく貢献するものとなることが期待できる。

3.2 ハイブリッド条件での多段型と重層型人工湿地の浄化性能の比較

多段型人工湿地の水理条件を好氣的な鉛直流に統一した結果、脱窒が制限され、窒素除去性能の向上が見込めなかったことから、2019 年 6 月に 3 段目のろ床を嫌氣的な水平流に変更し、2 段目での好気処理と 3 段目での嫌気処理を組み合わせ合わせたハイブリッド条件で下水処理を行うことで窒素除去性能の改善を試みた。ハイブリッド条件で下水処理を実施した 2019 年 6 月から 2020 年 7 月までの 14 か月間の A 区及び D 区の水質浄化性能の変遷をそれぞれ図 6 及び図 7 に、両者の下水浄化性能の比較を表 3 に示す。原水の BOD 濃度の平均値 100.9mg/L に対し、A 区及び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 20.1 及び 24.5mg

L であり、除去率はそれぞれ 80.1 及び 75.7%であった。鉛直流条件での処理水濃度や除去率と比較してハイブリッド条件での浄化性能の低下は明らかであり、3 段目ろ床を水平流として嫌気処理を強化したことで BOD 除去性能は低下した。鉛直流条件で僅かであった A 区と D 区の BOD 除去率の差はハイブリッド条件において広がったが、T 検定において有意な差は確認されなかった (P>0.05)。

NH₄⁺-N に着目すると、原水の平均濃度 20.3mg-N/L に対し、A 区及び D 区の処理水濃度の平均値はそれぞれ 2.97 及び 7.04mg-N/L であり、重層化ろ床と非重層化ろ床間で有意な差が確認された (P<0.05)。除去率はそれぞれ 85.4 及び 65.3%であった。3 段目のろ床を嫌氣的な水平流に変更したことによる影響の差異は、NH₄⁺-N の除去性能でより大きく現れた。図 8 に A 区及び D 区の処理水中の窒素成分の内訳の平均値を示す。図 5 と比較して NH₄⁺-N の占める割合が明らかに増加しており、ハイブリッド条件への変更で硝化が抑制されたことは明らかであった。本結果により、ハ

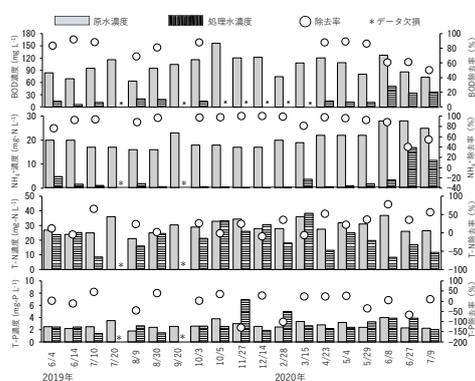


図6 非重層化ろ床で構成された多段型人工湿地のハイブリッド条件での14か月間の下水浄化性能の変遷

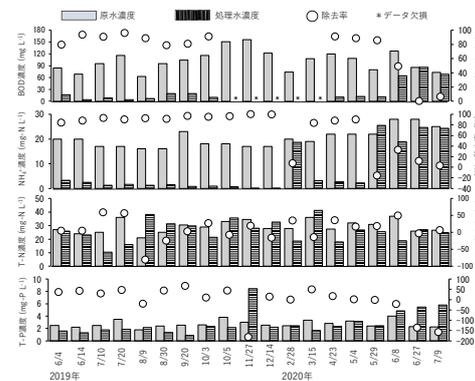


図7 重層化ろ床で構成された多段型人工湿地のハイブリッド条件での14か月間の下水浄化性能の変遷

表3 ハイブリッド条件での14カ月間のA区（非重層化ろ床）とD区（重層化ろ床）の下水浄化性能の比較

		非重層化ろ床				重層化ろ床			
		全期間		最後の3カ月間		全期間		最後の3カ月間	
		平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)	平均	SD (±)
BOD	原水濃度(mg L ⁻¹)	100.9	27.0	95.0	20.0	100.9	27.0	95.0	20.0
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	20.1	12.6	28.7	15.1	24.5	26.2	48.4	31.0
	除去率(%)*	80.1		69.8		75.7		49.1	
NH ₄ ⁺ -N	原水濃度(mg L ⁻¹)	20.3	3.5	25.0	2.7	20.3	3.5	25.0	2.7
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	2.97**	4.3	6.9	6.3	7.04**	9.1	19.1	8.8
	除去率(%)*	85.4		72.3		65.3		23.6	
T-N	原水濃度(mg L ⁻¹)	29.3	4.4	30.5	4.0	29.3	4.4	30.5	4.0
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	21.3**	8.2	16.4	5.9	26.0**	7.7	24.6	3.0
	除去率(%)*	27.3		46.2		11.3		19.3	
T-P	原水濃度(mg L ⁻¹)	2.74	0.57	2.83	0.68	2.74	0.57	2.83	0.68
	処理水濃度(mg L ⁻¹)	2.92	1.33	3.10	0.75	2.86	1.87	4.35	1.31
	除去率(%)*	-6.6		-9.5		-4.4		-53.7	

*原水及び処理水濃度の平均値より算出 **非重層化ろ床と重層化ろ床間に有意差あり (P<0.05)

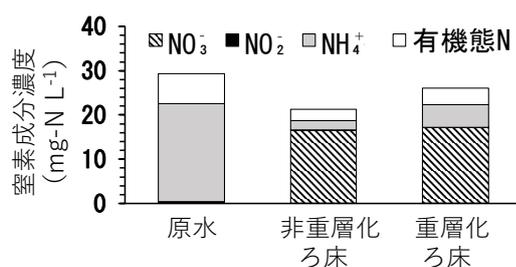


図8 A区（非重層化ろ床）とD区（重層化ろ床）のハイブリッド条件での最終処理水の窒素成分の比較

イブリッド条件の導入による好気処理への影響は、重層型ろ床でより大きく現れることが明らかとなった。

T-Nに着目すると、原水のT-N濃度の平均値は29.3mg-N/Lであり、A区及びD区の処理水濃度の平均値がそれぞれ21.3及び26.0mg-N/Lであったことから、除去率はそれぞれ27.3及び11.3%となった。鉛直流条件と同様にハイブリッド条件においても重層化ろ床と非重層化ろ床間で有意な差が確認された (P<0.05)。鉛直流条件での除去率と比較するとA区、D区ともに除去率は改善されたが、改善効果は僅かであった。図8の処理水中の窒素成分の内訳に示されるように、A区、D区ともにNO₃-Nの占める割合が大きく、3段目ろ床を水平流として嫌気条件を強化したにも関わらず依然として脱窒が制限となりT-N除去

性能が低いレベルに留まっていることが示された。この結果より、脱窒に利用可能な有機物の不足が窒素除去性能の低さの原因であると考えられた。A区の3段目ろ床では植物による脱窒促進作用が機能した可能性があるのに対し^{5,6)}、D区の3段目ろ床にはそのような可能性がないことから、ハイブリッド条件においても両者のT-N除去性能の差異は植物の有無により生じたことが推察された。

T-Pに着目すると、T-Pの原水での平均濃度が2.74mg-P/Lであったのに対し、A区及びD区の処理水濃度の平均値はそれぞれ2.92及び2.86mg-P/Lであり、原水の濃度を上回る結果となった。図6及び図7に示す除去性能の変遷では、A区では17サンプル中6サンプルで、D区では19サンプル中7サンプルで除去率がマイナスとなっていた。除去率がマイナスとなった原因として、ろ床内に蓄積したリンが時間を経て溶出に転じたことが考えられる。酸化条件下で鉄やアルミニウムと結合したリンが還元条件下では容易に溶出することが報告されている^{10,11)}。A区及びD区の2段目及び3段目ろ床に用いたろ材は浄水処理場で使用済みとなったろ過砂を再利用したものであり、浄水処理で使用された凝集剤に由来す

る鉄やアルミニウムが含まれていたことが推察される。したがって、好氣的な鉛直流条件での試験期間にろ過砂に含まれる鉄やアルミニウムと結合してろ床内に捕捉されたリンが、嫌気処理を強化したハイブリッド条件での試験期間では溶出に転じ、処理水濃度が原水濃度を上回る現象に至ったと考えられた。A区とD区の処理水濃度の平均値は同等であったことから、ろ床の重層化の有無に関わらず、そのような現象が生じたことになる。

ハイブリッド条件に変更して下水処理を行ってから約1年を経た最後の3か月間における原水濃度、最終処理水濃度及び流入水量の平均値から求めたA区のBOD及びT-Nの除去原単位は、それぞれ5.88g-BOD/m²d及び1.25g-N/m²dであり、D区ではそれぞれ6.17g-BOD/m²d及び0.78g-N/m²dであった。ろ床の重層化により省面積化したD区のBOD除去原単位はA区の1.1倍となったが、鉛直流条件での結果と同様にT-Nについては上回ることはできなかった。T-Pについては、A区、D区ともに処理水の平均濃度が原水の平均濃度を上回っており、除去原単位はゼロ以下となった。

4. 実証試験のまとめ

湖南浄化センターに設置した3段のろ床で構成されるパイロットスケールの多段型人工湿地の重層化ろ床及び非重層化ろ床の処理水質を比較することで、空気層の導入により地下に確保したろ床が、通常の地上に設置したろ床と同等に機能するの可否かを検証することを試みた。

その結果、ろ床が好氣的に維持される鉛直流条件におけるBOD、NH₄⁺-N及びT-Pの除去性能は、ろ床の重層化の有無に関わらず同等であり、重層化ろ床が通常のろ床と同等の働きを果たすことを確認することができた。しかし、T-N除去性能については、ろ床の重層化により低下することが明らかとなった。地下に設けた重層化ろ床には植物がなく、植物の脱窒促進作用がないことが非重

層化ろ床との差異を生み出していると推察された。

一方、多段型人工湿地に水平流を導入して嫌気処理を強化したハイブリッド条件では、NH₄⁺-Nの除去性能の低下が重層化ろ床において有意に顕著であり、重層化ろ床が非重層化ろ床に比して嫌氣的になり易いことが確認された。嫌気処理の強化により期待されたT-N除去性能の改善は、ろ床の重層化の有無に関わらず僅かであり、その原因として、脱窒に必要な有機物が不足していたことが考えられた。さらに、嫌気処理の強化は、ろ床の重層化の有無に関わらずリン除去性能の顕著な低下を引き起こした。

鉛直流条件で下水処理を行ってから1年を経た最後の3か月間で得られた非重層化ろ床の多段型人工湿地におけるBOD、T-N及びT-Pの除去原単位がそれぞれ7.54g-BOD/m²d、0.026g-N/m²d及び0.052g-P/m²dであったのに対し、3段目ろ床を重層化した多段型人工湿地における除去原単位はそれぞれ10.95g-BOD/m²d、-0.344g-N/m²d及び0.089g-P/m²dであり、ろ床の重層化による省面積化によりBOD及びT-Pの除去原単位は1.5倍程度改善できたが、T-Nについては改善することはできなかった。ハイブリッド条件では、ろ床の重層化によりBODの除去原単位は1.1倍となったが、T-N及びT-Pの除去原単位を改善することはできなかった。

本研究で対象とした多段型人工湿地による下水処理に要した処理水量あたりのエネルギー消費原単位0.32kWh/m³は、下水処理のエネルギー消費原単位として極めて低いレベルであり、無曝気で好氣的な水処理が行える人工湿地を下水の好気処理に適用することが下水道事業の脱炭素化に非常に有効であることを確認することができた。

参考文献

- 1) 国土交通省国土計画局:「国土の長期展望」中間とりまとめ, 2013.

- 2) 鈴木 援, 谷口 崇至, 中野 和典, 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, 2021. 水環境学会誌, (掲載待ち)
- 3) Nakamura, K., Hatakeyama, R., Tanaka, N., Takisawa, K., Tada, C., Nakano, K., 2017. A novel design for a compact constructed wetland introducing multi-filtration layers coupled with subsurface superficial space, *Ecological Engineering* 100, 99-106.
- 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) Edwards, K.R., Cizkova, H., Zemanova, K., Santruckova, H, 2006. Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*, *Ecological Engineering* 27(2), 153-165.
- 6) 21) Zhai, X., Piwpuan, N., Arias, C.A., Headley, T., Brix, H., 2013. Can root exudates from emergent wetland plants fuel denitrification in subsurface flow constructed wetland systems? *Ecological Engineering* 61, 555-563.
- 7) Wu, H., Zhang, J., Ngo, H.H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., Liu, H., 2015. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology* 175, 594-601.
- 8) Wu, S., Kusch, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R., 2014. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water Research* 57, 40-55.
- 9) Liu, R., Zhao, Y., Doherty L., Hu, Y., Hao, X., 2015. A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chemical Engineering Journal* 279, 220-230.
- 10) Vymazal, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, *Science of the Total Environment* 380(1-3), 48-65.
- 11) Haritash, A.K., Dutta, S., Sharma, A., 2017. Phosphate uptake and translocation in a tropical Canna-based constructed wetland, *Ecological Processes* 6:12.