処理水循環が浄化槽の処理水質に与える影響 -多変量解析手法を用いた検討-

石黒 泰¹・Yenni TRIANDA²・藤澤 智成²・安福 克人³・奥村 信哉³・玉川 貴文⁴・
Joni Aldilla FAJRI⁵・李 富生¹

¹正会員 岐阜大学流域圏科学研究センター （〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1）

E-mail: ishiguro@green.gifu-u.ac.jp

E-mail: lifs@gifu-u.ac.jp

²岐阜大学大学院工学研究科博士前期課程 （〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1）

³一般財団法人岐阜県環境管理技術センター （〒500-8357 岐阜市六条大溝 4-13-6）

⁴東海環境事業株式会社 （〒501-0472 本巣市下福島 308）

⁵岐阜大学流域圏科学研究センター （〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1）

人員比（実使用人数/設計処理対象人数）が0.8、0.14、0.29と異なる3基の浄化槽に対して処理水の循環運転を行い、処理水循環が処理水質へ与える影響をクラスター分析と主成分分析を用いて解析した。浄化槽の処理水循環を行うことより、脱窒が促進され、全窒素の減少がみられた。いっぽうで、処理水循環によるBODの変化はみられなかった。クラスター分析と主成分分析による解析により、有機性の負荷に関連する測定項目と硝化・脱窒に関連する測定項目をグループ化することができた。それらのグループは関連性が低く、処理水質の向上を目指す場合、窒素負荷には処理水循環が有効であるが、有機性の負荷には他の対策が必要であることが示唆された。

Key Words: Johkasou, Wastewater Treatment, Denitrification, Nitrogen, BOD

1. はじめに

浄化槽は、家庭から排出される汚水を処理するための小型污水处理施設として下水道未整備地区で利用されており、平成26年度末における我が国での普及人口は1,124万人、普及率は8.92%¹⁾と生活排水処理において重要な役割を果たしている。

しかし、浄化槽は下水道と異なり分散設置、個別処理のため、使用状況だけではなく維持管理方法により放流水の水質が大きく変わる²⁾。

岐阜県では浄化槽の法定検査を行う検査機関、保守点検業者、清掃業者の3業種が連携して浄化槽を管理することにより水質の向上を図っている³⁾。しかし、平成24年度末において約10%の浄化槽が岐阜県内の浄化槽業界の基準を満たしていないのが現状である³⁾。そのため、浄化槽の保守点検や清掃の際に業者が行うことのできる運転設定の変更により浄化槽の処理水質を改善できる手法の開発が望まれている。

近年、有機物の除去性能だけではなく、窒素除去

性能を併せ持つ浄化槽が多く設置されている。これらの多くは、生物学的硝化脱窒法⁴⁾で窒素除去を行っている。生物学的硝化脱窒法とは、アンモニア態窒素(NH_4^+-N)を亜硝酸態窒素(NO_2^--N)あるいは硝酸態窒素(NO_3^--N)に酸化した後、これら酸化態窒素を還元し、窒素ガスとして除去する方法である。浄化槽においては好気槽で硝化された窒素(NO_2^--N あるいは NO_3^--N)を嫌気槽に返送することで、脱窒により、窒素(N_2)として大気に放出させる⁵⁾。したがって、処理水を嫌気槽に返送する処理水循環により、脱窒が促進され窒素が除去された環境負荷の低い処理水が浄化槽から放出できるようになる。

これまでに、合成污水や成分を調整した生活排水を用いて処理水循環による窒素除去効果の検討を行った研究はあるものの^{5,6)}、実現場で稼働している浄化槽において処理水循環が水質に与える影響を詳細に検討した例は少ない⁷⁾。また、処理水循環が窒素除去と有機物除去の両方に与える影響の詳細な検討は浄化槽の実現場ではほとんどされていない。

本研究では浄化槽の保守点検や清掃の際に業者が

夾雑物除去槽 嫌気ろ床槽 接触ろ床槽 処理水槽

図-1 試験に用いた浄化槽の概略と試料採取場所
① 夾雑物除去槽、② 嫌気ろ床槽流入部、③ 嫌気ろ床槽流出部、④ 接触ろ床槽、⑤ 処理水槽

表-1 調査施設および運転設定概要

		浄化槽		
		No.1	No.2	No.3
設計処理対象人員（人）		5	7	7
実使用人員（人）		4	1	2
人員比		0.8	0.14	0.29
前回清掃日（年/月/日）		2015/3/27	2015/2/27	2014/8/2
設定1	ばっ気槽送風量 4/23-5/14 (L/分)	31	48	81
	循環比	0	0	0
設定2	ばっ気槽送風量 5/14-6/11 (L/分)	62	43	76
	循環比	0	3	3
設定3	ばっ気槽送風量 6/11-8/27 (L/分)	57	35	77
	循環比	3	4	2

行うことのできる浄化槽の運転設定の知見を得ることを目的とし、一般家庭で稼働している浄化槽において、処理水循環が処理水質に与える影響を調査し、多変量解析手法を用いてその関係性を解析した。

2. 方法

(1) 調査対象浄化槽

岐阜県羽島市（No.1）および岐阜市（No.2, No.3）に設置されている3基の小型合併処理浄化槽（CE型、フジクリーン工業社製）を調査対象とした。

CE型浄化槽は、接触ろ床方式であり、放流水の水質、BOD=20 mg/L以下、全窒素20 mg/L以下、SS=20 mg/L以下の処理性能を持つとされている。夾

雑物除去槽、嫌気ろ床槽、接触ろ床槽、処理水槽の4槽で汚水の処理を行い、その後消毒槽にて処理水を塩素消毒した後に放流する（図-1）。

夾雑物除去槽および嫌気ろ床槽が嫌気槽であり、嫌気ろ床槽には骨格球状嫌気ろ材が充填された嫌気ろ床が設置されている。接触ろ床槽は好気槽であり、散気管から常時ばっ気が行われている。接触ろ床槽には上部に板状の接触材、下部に網様円筒状ろ材が充填された接触ろ床が設置されている。処理水槽は沈殿槽であり、循環水は処理水槽底部から循環エアリフトポンプにより夾雑物除去槽へ返送される。散気バルブ、循環バルブ、放流バルブの3種類のバルブによりプロワからの空気が散気管、循環エアリフトポンプ及び放流エアリフトポンプに分配され、循環バルブ操作により循環水量を調整する。また、循環バルブ及び放流バルブ操作に伴いばっ気槽送風量が変化する。

本研究で調査対象とした3基の浄化槽はいずれも一般家庭に設置されているものであり、調査期間においても通常通り使用されていた。各浄化槽の処理対象人員および実使用人員、人員比（設計処理対象人数に対する実使用人数の割合）、前回清掃日を表-1に示した。

(2) 浄化槽の運転設定

調査は2015年4月23日～8月27日の期間行い、4月23日～5月14日の設定1では3基全てで処理水循環を行わない循環比0とした。

浄化槽No.1は循環比0（設定1）の処理水質が悪く、ばっ気槽送風量が少なかったことから、5月14日～6月11日（設定2）において処理水循環は行わず、放流バルブ操作によりばっ気槽送風量を増加させた。維持管理要領書では流入水量の2～4倍水を処理水槽底部から夾雑物除去槽へ返送することが推奨されているため、その後の6月11日～8月27日（設定3）において、日平均流入水量の3倍の循環比3で処理水循環を行った。なお、浄化槽への流入水量を実際に測定することは困難であるため、各設定への変更前4週間における1日の平均水道使用量を日平均流入水量と考え、循環比の設定を行った。

浄化槽No.2は4月23日～5月14日の循環比0（設定1）終了後、5月14日～6月11日（設定2）において循環比3で処理水循環を行ったところ、BODと全窒素がともに処理性能の20mg/Lを下回っていた。そのため、6月11日～8月27日（設定3）においては維持管理要領書で推奨されている最大の循環水量である循環比4に設定した。

浄化槽No.3は5月14日～6月11日（設定2）に

において循環比3で処理水循環を行ったところ、BODにおいて処理性能の20mg/Lを超えることが増えたため、6月11日～8月27日（設定3）においては維持管理要領書で推奨されている最小の循環水量である循環比2に設定した。

各浄化槽のばっ気槽送風量と循環比の設定を表-1に示した。

なお、浄化槽No.1および浄化槽No.3では槽内にサカマキガイの大量発生が見られたため、7月9日に硫酸アンモニウムを用いてサカマキガイの駆除を行った。

(3) 調査方法

期間中週1回の頻度で調査を行った。各浄化槽における試料採取は図-1に示した5か所（①夾雑物除去槽：中央付近の中間水、②嫌気ろ床槽流入部：中央付近の表層水、③嫌気ろ床流出部：バッフル内中央付近の表層水、④接触ろ床槽：中央付近の表層水、⑤処理水槽：中央付近の表層水）から行った。現地で試料採取場所のDO（ID-100、飯島電子工業株式会社）、pH（IM-30P、東亜ディーケーケー株式会社）、ORP（HM-31P、東亜ディーケーケー株式会社）の測定を行うとともに、各槽のスカム厚、堆積汚泥厚と循環水量を測定した。その後、採水瓶に約2Lの試料水を採取した。なお、循環水量はCE型浄化槽の維持管理要領書に従い、夾雑物除去槽にある循環管の出口で実測した。

採取した試料水は実験室にて濁度、SS（浮遊懸濁態物質）、VSS（SS中の有機物割合）、BOD（生物化学的酸素要求量）、C-BOD（有機物の分解に伴う酸素消費量）、DOC（溶存有機炭素濃度）、全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ （アンモニア態窒素量）、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ （亜硝酸態窒素量）、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ （硝酸態窒素量）、全リンを測定した。なお、全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、全リンについては、予備調査において夾雑物除去槽と嫌気ろ床槽流入部がほぼ同じ値を示し、接触ろ床槽と処理水槽がほぼ同じ値を示したことから、①夾雑物除去槽、③嫌気ろ床槽流出部、⑤処理水槽の3か所のみを測定した。

濁度は濁度計（2100N、東亜ディーケーケー株式会社）を用いて測定した。SSは孔径 $1\mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙（GF/B、Whatman）で一定量の試料水をろ過し、ろ紙を 105°C で2時間乾燥した後に、ろ紙上の残留物を測定し算出した。VSSはSSの測定が終了したろ紙を $600^\circ\text{C}\pm 25^\circ\text{C}$ にて30分間強熱乾燥し、その減量を測定して算出した。BODは、JIS K 0102 21⁸⁾、C-BODは、JIS K 0102 21 備考 1⁹⁾に準拠して測定した。測定には土日対応自動BOD測定装置（ラ

ボテック株式会社）を用いた。DOCは、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルター（C045A、アドバンテック株式会社）でろ過した試料水を超純水で20倍希釈し、全有機炭素計（TOC-VCSH、株式会社島津製作所）を用いて測定した。全窒素は、JIS K 0102 45.2¹⁰⁾に準拠し、分光光度計（UV-1800、株式会社島津製作所）を用いて測定した。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は、イオンクロマトグラフ（HIC-SP、株式会社島津製作所）を用いて測定した。なお、全窒素と無機態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）の差を有機態窒素とした。全リンは、JIS K 0102 46.3¹¹⁾に準拠し、分光光度計（UV-1800、株式会社島津製作所）を用いて測定した。

なお、本研究におけるばっ気槽送風量は2系統ある散気管の風量をそれぞれの接続部分で風量計（AS-120、東浜工業株式会社）を用いて測定し、その和とした。

(4) 統計解析

調査によって得られた各浄化槽処理水の測定項目はTukey法を用いて設定ごとの有意差検定を行った。

主要測定項目に対しては無相関の検定により相関関係の有意性を検定するとともに、ヴォード法を用いた階層型のクラスター分析と主成分分析を行った。なお、データはエクセル統計（株式会社社会情報サービス）を用いて解析した。

3. 結果と考察

(1) 浄化槽の水質の変化

図-2に浄化槽No.1におけるBOD、全窒素、全リンの変化を示した。BOD（図-2A）は循環比0である設定1において、夾雑物除去槽と嫌気ろ床槽流入部がそれぞれ140～160mg/L、130～160mg/Lと高く、嫌気ろ床槽流出部と接触ろ床槽、処理水槽が17～55mg/L、16～51mg/L、11～48mg/Lと低かった。処理水循環を行わず、ばっ気槽送風量を増加させた設定2も同様の傾向であった。これらのことから、有機性の汚濁物質は1次（嫌気）処理、特に嫌気ろ床槽で多く除去され则认为る。処理水循環を行った設定3においては夾雑物除去槽と嫌気ろ床槽流入部がそれぞれ38～78mg/L、30～80mg/Lと処理水循環を行わない場合に比べて低くなった。いっぽうで、嫌気ろ床槽流出部と接触ろ床槽、処理水槽は18～39mg/L、11～44mg/L、6.5～39mg/Lであり、いずれの槽においても処理水循環を行っていない場合と比べて有意

図-2 浄化槽 No. 1 における BOD, 全窒素, 全リンの変化
 ◇ : 夾雑物除去槽, △ : 嫌気ろ床槽流入部, * : 嫌気ろ床槽流出部, □ : 接触ろ床槽, ○ : 処理水槽
 z : 設定 1 : ばっ気槽送風量 31 L / 分, 循環比 0, 設定 2 : ばっ気槽送風量 62 L / 分, 循環比 0, 設定 3 : ばっ気槽送風量 57 L / 分, 循環比 3

な増減はみられなかった。

全窒素 (図-2B) は夾雑物除去槽において, 処理水循環を行っていない設定 1, 設定 2 ではそれぞれ 36~54 mg/L, 32~35 mg/L と高い値であったが, 処理水循環を行った設定 3 では 8.9~23 mg/L へと減少した。処理水槽では, 設定 1, 設定 2 において 17~36 mg/L, 15~20 mg/L あった全窒素が処理水循環により 6.8~18 mg/L と減少した。

全リン (図-2C) は, すべての槽において処理水循環の影響は見られず, 夾雑物除去槽, 嫌気ろ床槽流出部, 処理水槽がそれぞれ, 3.0~5.1 mg/L, 3.0~4.8 mg/L, 2.9~4.8 mg/L の範囲で変動しており, すべての槽で変動パターンが類似していた。

図-3 に浄化槽 No. 2 における BOD, 全窒素, 全リンの変化を示した。BOD (図-3A) は浄化槽 No. 1 と

図-3 浄化槽 No. 2 における BOD, 全窒素, 全リンの変化
 ◇ : 夾雑物除去槽, △ : 嫌気ろ床槽流入部, * : 嫌気ろ床槽流出部, □ : 接触ろ床槽, ○ : 処理水槽
 z : 設定 1 : ばっ気槽送風量 48 L / 分, 循環比 0, 設定 2 : ばっ気槽送風量 43 L / 分, 循環比 3, 設定 3 : ばっ気槽送風量 35 L / 分, 循環比 4

同様に処理水循環を行っていない設定 1 では夾雑物除去槽と嫌気ろ床槽流入部がそれぞれ 76~130 mg/L, 65~130 mg/L と高く, 嫌気ろ床槽流出部と接触ろ床槽, 処理水槽が 6.6~19 mg/L, 3.8~37 mg/L, 3.0~11 mg/L と低かった。また, 循環比 3 の設定 2 および循環比 4 の設定 3 の夾雑物除去槽ではそれぞれ 33~62 mg/L, 4.6~44 mg/L となり, 循環比が高いほど BOD が低くなっていた。いっぽうで, 処理水槽においては, 設定 1, 設定 2, 設定 3 がそれぞれ 3.0~11 mg/L, 3.9~12 mg/L, 0.8~6.1 mg/L と有意な増減はみられなかった。

全窒素 (図-3B) において, 浄化槽 No. 2 ではすべての槽が類似した変化を示した。処理水槽において循環運転なしの設定 1 では 29~47 mg/L であったが, 循環運転を行った設定 2, 設定 3 において 7.3~11 mg/L, 4.5~8.4 mg/L と循環比が高くなる

図-4 浄化槽 No. 3 における BOD, 全窒素, 全リンの変化
 ◇ : 夾雑物除去槽, △ : 嫌気ろ床槽流入部, * : 嫌気ろ床槽流出部, □ : 接触ろ床槽, ○ : 処理水槽
 z : 設定 1 : ばっ気槽送風量 81 L / 分, 循環比 0, 設定 2 : ばっ気槽送風量 76 L / 分, 循環比 3, 設定 3 : ばっ気槽送風量 77 L / 分, 循環比 2

に従い全窒素量が減少していた。

全リン (図-3C) は, 浄化槽 No. 1 と同様に変動パターンがすべての槽で類似していた。処理水槽における全リンは処理水循環を行っていない設定 1 で 2.2~4.7 mg/L, 循環比 3 の設定 2 で 3.4~3.7 mg/L, 循環比 4 の設定 3 で 2.2~3.9 mg/L であり, 処理水循環の影響は見られなかった。

図-4 に浄化槽 No. 3 における BOD, 全窒素, 全リンの変化を示した。BOD (図-4A) は浄化槽 No. 1, No. 2 と同様に, 処理水循環を行わなかった設定 1 では, 夾雑物除去槽と嫌気ろ床槽流入部がそれぞれ 190~270 mg/L, 210~260 mg/L と高く, 嫌気ろ床槽流出部, 接触ろ床槽, 処理水槽が 15~40 mg/L, 10~33 mg/L, 5.6~34 mg/L と低かった。夾雑物除去槽における循環比 3 の設定 2 および循環比 2 の設定 3 はぞ

れぞれ 63~150 mg/L, 50~140 mg/L となり, 処理水循環を行うことにより BOD は減少した。いっぽうで, 処理水槽の BOD は設定 1, 設定 2, 設定 3 がそれぞれ 5.6~34 mg/L, 18~58 mg/L, 4.0~53 mg/L と有意な差は見られなかった。

全窒素 (図-4B) は夾雑物除去槽において浄化槽 No. 1 と類似した変化を示した。処理水循環を行っていない設定 1 において 34~52 mg/L と高い値であったが, 処理水循環を行った設定 2, 設定 3 ではそれぞれ, 16~24 mg/L, 15~34 mg/L と減少した。いっぽうで, 処理水槽においては処理水循環なしの設定 1 では 17~36 mg/L, 処理水循環を行った設定 2, 設定 3 において 12~15 mg/L, 9.6~25 mg/L となり, 有意な差は見られなかったものの循環比 3 の設定 2 において減少する傾向がみられた。浄化槽 No. 3 は設定 3 の循環比が 2 と低かったため, 処理水循環による脱窒効果が十分に得られなかったかもしれない。

全リン (図-4C) は, 浄化槽 No. 1, 浄化槽 No. 2 と同様に変動パターンがすべての槽で類似していた。処理水槽における全リンは処理水循環を行っていない設定 1 で 4.1~4.3 mg/L, 循環比 3 の設定 2 で 4.8~5.5 mg/L, 循環比 4 の設定 3 で 3.0~5.2 mg/L であり, 各設定間で有意な差はみられなかった。

人員比が 0.8, 0.14, 0.29 と異なる 3 基の浄化槽に対する処理水循環の影響を調査した。全ての浄化槽に共通して確認された影響は全窒素の減少である。浄化槽においては好気槽で硝化された窒素 (NO_2^- -N あるいは NO_3^- -N) を嫌気槽に返送することで, 脱窒が生じることが知られている^{6,7,12)}。処理水循環時の処理水槽の総窒素は, これまでの報告^{7,13,14)} と類似したものであり, 本研究で用いた 3 基の浄化槽においても, 接触ろ床槽で硝化され, 生成された NO_3^- -N が処理水循環により, 夾雑物除去槽に返送されることで脱窒が促進され, 結果的に処理水槽の窒素量も減少したと考える。同時に, 循環比が高くなるに従い全窒素量が減少する傾向もみられた。井出・武藤⁵⁾ は循環比 4 が適度であることを示しており, 嶋津¹³⁾ は循環比 5 程度が処理水質を保つ上での限界値であることを示唆しており, 窒素除去においては, 循環比 4 程度が適しているかもしれない。

BOD において処理水循環により明確な変化が見られたのは, 1 次処理 (夾雑物除去槽, 嫌気ろ床槽流入部) であった。1 次処理における BOD の変動には貯留汚泥の可溶化や微生物活性の変化など温度上昇の影響も考えられる。しかし, 本研究においては処理水循環を行っていない浄化槽 No. 1 の設定 2 では

表-2 浄化槽 No. 1 の処理水槽における主要測定項目の相関係数

	ばっ気槽 送風量 (L/分)	循環水量 (L/分)	濁度 (NTU)	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	BOD (mg/L)	C-BOD (mg/L)	DOC (mg/L)	全窒素 (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	有機態 窒素 (mg/L)	全リン (mg/L)	ORP (mV)	pH	DO (mg/L)
ばっ気槽 送風量 (L/分)	1.00															
循環水量 (L/分)		1.00														
濁度 (NTU)			1.00													
SS (mg/L)				0.74**	1.00											
VSS (mg/L)					0.72**	1.00**	1.00									
BOD (mg/L)						0.79**	0.81**	0.83**	1.00							
C-BOD (mg/L)							0.74**	0.68**	0.71**	0.93**	1.00					
DOC (mg/L)								1.00								
全窒素 (mg/L)									1.00							
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	-0.62**	-0.56*								0.86**	1.00					
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	-0.82**											1.00				
有機態 窒素 (mg/L)	0.47*			0.50*	0.48*								1.00			
全リン (mg/L)			0.90**	0.65**	0.64**	0.71**	0.72**						0.62**	1.00		
ORP (mV)	0.58*					-0.49*	-0.50*		-0.71**	-0.67**			-0.51*	1.00		
pH	-0.65**									0.59*	-0.73*				1.00	
DO (mg/L)	0.73**									-0.48*				0.54*	-0.51*	1.00

図中の**は1%, *は5%の水準で有意を示す(無相関検定)

図-5 浄化槽 No. 1 処理水槽における主要測定項目のクラスター分析

BOD の低下が起こっていないことや、同時期に行った同型浄化槽の調査においては嫌気槽での低下が起こっていないこと（データ未掲載）から本研究における嫌気槽での BOD 低下の主要因は処理水循環によるものであると考える。いっぽうで、処理水循環を行うことにより汚濁負荷の高い水が 2 次処理に押し出されることになるが、嫌気ろ床槽流出部と接触ろ床槽、処理水槽の BOD は増加していない。このことは、1 次処理から流入してきた有機物を除去できる有機物除去性能が 2 次処理においては維持されていたためと考える。

(2) 処理水循環が処理水質に与える影響の統計解析

表-2 に浄化槽 No. 1 の処理水槽における主要測定項目の相関係数を示した。浄化槽 No. 1 は設定 2 において処理水循環は行わず、ばっ気槽送風量を増加させた。設定 3 では増加させたばっ気量を維持したまま循環比 3 で処理水循環を行った。このため、浄化槽 No. 1 ではばっ気槽送風量と他の測定項目との関係も検討した。

窒素成分に着目すると、NH₄⁺-N はばっ気槽送風量と相関係数-0.82 と高い負の相関を示した。また、設定 1、設定 2、設定 3 のすべてのデータを使用すると NH₄⁺-N と硝化により生成される NO₃⁻-N との間に相関はみられないものの（表-2）、処理水循環を行った設定 3 を除く設定 1 と設定 2 のデータでは相関係数-0.61 の 5% 水準で有意な負の相関がみられた。また、ばっ気槽送風量は ORP および DO と正の相関を持つことから、ばっ気量送風量の増加により硝化が進行したと考える。

いっぽうで、NH₄⁺-N は設定 1 では 3.7~27 mg/L、設定 2 では 0.7~3.2 mg/L、設定 3 では 0.2~4.9 mg/L であったのに対し、NO₃⁻-N は設定 1 で 1.5~7.7 mg/L、設定 2 では 9.3~13 mg/L、設定 3 では 0.5~4.9 mg/L であり、ばっ気量増加による NH₄⁺-N の減少量は NO₃⁻-N の増加量のより多かった。このことは、接触ろ床の生物膜内部にできる嫌気層では脱窒がおこっており¹²⁾、ばっ気槽送風量の増加により、生成された NO₃⁻-N の一部は好気槽内

循環水量と窒素成分との関係性を見てみると循環水量と全窒素の間に相関係数は-0.56と低いものの負の相関がみられたことから、処理水循環による脱窒の促進も生じていると考える。しかし、実際に脱窒が生じるのは夾雑物除去槽であるため、処理水槽における循環水量と全窒素の直接的な相関関係は低くなったと考える。

それら主要測定項目のクラスター分析を行い、結合距離2.0以下で分類したところ、3つのクラスターに分けられた(図-5)。

主成分分析を行った結果(図-6)、寄与率は第1主成分が35.88%、第2主成分が28.61%、第3主成分が13.15%となった。第1主成分負荷量が高い測定項目は濁度、有機態窒素、BOD、C-BOD、SS、VSS、全リンであり、すべての項目の負荷量は0.6以上であった。第2主成分負荷量が高い測定項目はばっき槽送風量、ORP、DO、pH、全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ となり、すべての項目の負荷量の絶対値は0.7以上であった。第3主成分負荷量が高い測定項目は循環水量と

[illegible]

III 261

図-7 浄化槽 No. 2 処理水槽における主要測定項目のクラスター分析

図-8 浄化槽 No. 2 処理水槽における主要測定項目の主成分分析とクラスター分析による特徴づけ
○：第1主成分負荷が高い測定項目，●：第2主成分負荷が高い測定項目，△：第3主成分負荷が高い測定項目 破線で囲んだ測定項目はクラスター分析により同一クラスターに分類された測定項目

NO_3^- -N であり主成分負荷量はそれぞれ、0.66、-0.71 であった。DOC については寄与率 5.2% の第5主成分の負荷量が高かった。

主成分分析の結果とクラスター分析の結果を併せてみると（図-6），第1主成分負荷量の高い測定項目とクラスターⅢを構成する測定項目は一致した。このグループには BOD や C-BOD、濁度とともに SS、VSS、有機態窒素が含まれ、それぞれの測定項目間においても相関がある（表-2）。いっぽうで、DOC は第5主成分負荷が高くクラスター分析においてもクラスターⅡに含まれることから BOD や C-BOD、

濁度に関連が強い物質は懸濁性の有機物であることが示された。また、全リンも同じグループに含まれることから、リンは懸濁性の有機物と関連性が強いと考える。

第2主成分負荷量が高い測定項目のうち、クラスターⅠに分類された測定項目は正の主成分負荷量を持ち、クラスターⅡに分類された測定項目は負の主成分負荷量であった。このことから、ばつき槽送風量の増加により、硝化が促進され NH_4^+ -N が減少することで pH が低下する。また、前述の接触ろ床の生物膜内部にできる嫌気層で起こっている脱窒¹²⁾により NO_3^- -N の一部が減少し、全窒素が減少したと考える。

循環水量と NO_3^- -N は第3主成分負荷量が高い項目に分類されており、寄与率は低いものの、循環により脱窒が促進され浄化槽内の窒素量が減少し、処理水槽に蓄積される NO_3^- -N も減少したと考える。

表-3 に浄化槽 No. 2 の処理水槽における主要測定項目の相関係数を示した。窒素成分に着目すると、全窒素が循環水量と負の相関を示した。このことから、処理水循環が脱窒を促進したと考える。また、 NH_4^+ -N は循環水量および NO_3^- -N と負の相関関係があった。処理水循環を行っていない設定1においては処理水槽の無機態窒素のほとんどが NH_4^+ -N であったが、処理水循環を開始した直後から NH_4^+ -N が激減し、処理水循環を行った設定2、設定3では無機態窒素のほとんどが NO_3^- -N になっていたことから（データ未掲載）、処理水循環は脱窒を促進するとともに硝化を促進したと考える^{7,14)}。

有機性物質の負荷量を表す C-BOD は有機態窒素、全リンと正の相関を示していた。しかし、浄化槽 No. 2 は No. 1 と異なり、BOD、C-BOD と SS、VSS に相関関係は見られなかった。いっぽうで BOD と C-BOD は循環水量と負の相関関係にあった。

浄化槽 No. 2 の処理水槽における主要測定項目のクラスター分析を行い、結合距離 2.0 以下で分類したところ、3つのクラスターに分けられた（図-7）。クラスターⅠは循環水量、ORP、 NO_3^- -N により構成され、クラスターⅡは濁度、BOD、C-BOD、有機態窒素、全リン、SS、VSS、DO で構成されていた。クラスターⅢは DOC、全窒素、 NH_4^+ -N、pH により構成されていた。

主成分分析を行った結果（図-8）、寄与率は第1主成分が 43.99%、第2主成分が 24.23%、第3主成分が 10.79% となった。第1主成分負荷量が高い測定項目は濁度、有機態窒素、BOD、C-BOD、全リン、 NH_4^+ -N、全窒素、pH、ORP、循環水量であり、そのうち ORP と循環水量が負の主成分負荷量であった。

表-4 浄化槽 No. 3 の処理水槽における主要測定項目の相関係数

	循環水量 (L/分)	濁度 (NTU)	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	BOD (mg/L)	C-BOD (mg/L)	DOC (mg/L)	全窒素 (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	有機態 窒素 (mg/L)	全リン (mg/L)	ORP (mV)	pH	DO (mg/L)
循環水量 (L/分)	1.00														
濁度 (NTU)		1.00													
SS (mg/L)			1.00												
VSS (mg/L)			0.99**	1.00											
BOD (mg/L)			0.58*	0.83**	0.84**	1.00									
C-BOD (mg/L)			0.61**	0.81**	0.83**	0.97**	1.00								
DOC (mg/L)			0.67**				1.00								
全窒素 (mg/L)								1.00							
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)			0.48*	0.61**	0.60**	0.73**	0.72**		1.00						
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)										1.00					
有機態 窒素 (mg/L)			-0.49*								1.00				
全リン (mg/L)			0.93**	0.49*	0.48*	0.63**	0.64**	0.48*	0.52*	-0.55*	1.00				
ORP (mV)			-0.70**							0.54*	-0.83**	1.00			
pH								0.74**		-0.59*			1.00		
DO (mg/L)			-0.56*	-0.50*	-0.48*	-0.60**	-0.48*		-0.54*		-0.55*				1.00

図中の**は1%, *は5%の水準で有意を示す(無相関検定)

図-9 浄化槽 No. 3 処理水槽における主要測定項目のクラスター分析

第2主成分負荷が高い測定項目はSS, VSS, NO₃⁻-N, DOCであり、DOCのみが負の主成分負荷量であった。DOのみが第3主成分負荷量が高い測定項目であり、主成分負荷量は0.73であった。

主成分分析の結果とクラスター分析の結果を併せてみると(図-8), 第1主成分負荷量と第2主成分負荷量とともに正の値となるところにクラスターIIを構成する測定項目が分布しており、このグループにはBODやC-BOD, 濁度とともにSS, VSS, 有機態窒素が含まれる。また、DOCは第2主成分負荷が高く、クラスターIIに分類されこのグループには含まれな

図-10 浄化槽 No. 3 処理水槽における主要測定項目の主成分分析とクラスター分析による特徴づけ
○：第1主成分負荷が高い測定項目、●：第2主成分負荷が高い測定項目、△：第3主成分負荷が高い測定項目 破線で囲んだ測定項目はクラスター分析により同一クラスターに分類された測定項目

いことから浄化槽 No. 2 においても BOD や C-BOD, 濁度に関連が強い物質が懸濁性の有機物であることが示された。また、全リンも同じグループに含まれることから、懸濁性有機物と関連性が強いと考える。

いっぽうで、クラスターIを構成する測定項目は第2主成分負荷量が負の位置に分布し、クラスター

III を構成する測定項目は第1主成分負荷量が正で第2主成分負荷量が負の位置に分布しており、これらが硝化・脱窒に関連していると考えられ、循環水量もクラスター I に含まれることから、処理水循環は硝化・脱窒に影響をおよぼすと考えられた。

表-4 に浄化槽 No. 3 の処理水槽における主要測定項目の相関係数を示した。浄化槽 No. 3 では循環水量はすべての測定項目と相関関係は見られなかった。このことは前述のように浄化槽 No. 3 の循環設定が低く明確な脱窒の促進が得られなかったことに起因すると考える。いっぽうで、有機性の負荷量を表す C-BOD は SS, VSS, 全リンと正の相関を示していた。

浄化槽 No. 3 の処理水槽における主要測定項目のクラスター分析を行い、結合距離 2.0 以下で分類したところ、大きく 3 つのクラスターに分類された(図-9)。クラスター I は循環水量、濁度、有機態窒素、DOC, SS, VSS, C-BOD, 全リンにより構成され、クラスター II は全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pH, クラスター III は $\text{NO}_3^-\text{-N}$, ORP, DO で構成されていた。

主成分分析を行った結果(図-10)、寄与率は第1主成分が 40.76%, 第2主成分が 27.86%, 第3主成分が 10.13% となった。第1主成分負荷量が高い測定項目は濁度、有機態窒素、BOD, C-BOD, 全リン, SS, VSS, DOC, DO, ORP であり、そのうち ORP と DO が負の主成分負荷量であった。第2主成分負荷量が高い測定項目は全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pH, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, であり、その中で全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pH が負の主成分負荷量であった。循環水量のみが第3主成分負荷量が高い測定項目であり、主成分負荷量は -0.90 であった。

主成分分析の結果とクラスター分析の結果を併せてみると(図-10)、クラスター I を構成し、第1主成分負荷量が高い測定項目は、濁度、有機態窒素、BOD, C-BOD, 全リン, SS, VSS, であった。このグループには BOD や C-BOD, 濁度とともに SS, VSS, 有機態窒素が含まれること、DOC は同じクラスター I であるものの第2主成分負荷量が高いグループであることから BOD や C-BOD, 濁度に関連が強い物質が懸濁性の有機物であることが示された。また、全リンも同じグループに含まれることから、全リンは懸濁性の有機物質と関連性が強いと考える。クラスター II および III を構成し、第2主成分負荷量が高い全窒素、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pH, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は脱窒および硝化に関連している測定項目のグループであると考えられる。

人員比が 0.8, 0.14, 0.29 と異なる 3 基の浄化槽の処理水槽から得られた測定項目の相関関係を調べ

るとともに、クラスター分析と主成分分析を用いてその特徴づけを行ったところ、3 基の浄化槽ともに、BOD や C-BOD で表される有機性の負荷量と SS, VSS, 有機態窒素などと類似した分布をしており、グループ化することができた。さらに、全リンも同一のグループに含まれた。いっぽうで、DOC はすべての浄化槽で BOD や C-BOD とは別のグループに分類された。これらのことから懸濁性の有機物が有機性の負荷(BOD, C-BOD)と関連性が強いことが示された。魏ら¹⁵⁾は浄化槽において BOD と関連性がある透視度に関わる物質が懸濁性の物質であることを報告しており、本研究の結果と一致する。

いっぽうで、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 全窒素, pH, ORP, などの硝化・脱窒に関係すると考えられる測定項目もグループ化することができた。

これら 2 つのグループを構成する測定項目は第1-第2主成分平面上で混在することなくグループ化されたことから、これらのグループ間の関連性は低いと考える。藤村・中島⁷⁾は浄化槽の処理水循環による BOD 低減効果を報告しているが、その原因として処理水循環時の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の減少による N-BOD の減少を挙げており、本研究の結果と矛盾しない。これらのことから、浄化槽放流水の水質改善を考える場合、窒素の負荷と BOD, C-BOD に代表される有機性の負荷は関連性が低く、窒素に対しては処理水循環が有効であるが、有機性の負荷に対しては他の対策を検討する必要があることが示唆された。

4. 結論

本研究では人員比が 0.8, 0.14, 0.29 と異なる 3 基の浄化槽に対して処理水循環を行い、浄化槽の処理水循環が処理水質への与える影響を検討するとともに、クラスター分析と主成分分析を用いて測定項目の関連性を解析した。

浄化槽の水を循環することにより、脱窒が促進され、処理水の窒素は減少した。いっぽうで、処理水循環による BOD およびリンの変化はみられなかった。

クラスター分析と主成分分析による解析により、BOD や C-BOD で表される有機性の負荷に関連する測定項目と硝化・脱窒に関連する無機態窒素などの測定項目をそれぞれグループ化することができた。それらのグループは関連性が低いことから、窒素に対しては処理水循環が有効であるが、有機性の負荷に対しては他の対策を検討する必要があることが示唆された。また、BOD の有機性の負荷には溶解性の

物質より懸濁性の物質の関連が強いことが示された。

謝辞：本研究でご助言をいただいた，岐阜大学応用生物科学部 平松研教授，岐阜大学工学部 山田俊郎准教授，岐阜大学流域圏科学研究センター 景山幸二教授，廣岡佳弥子准教授，魏永芬准教授，吉山浩平助教（現滋賀県立大学）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：平成 26 年度末の污水处理人口普及状況について
- 2) 渡邊昇：岐阜県における生活系污水处理の課題と改善策，環境技術，Vol. 43，No. 9，pp. 2-5，2014
- 3) 村居勘二，牧野好見，米沢正昭：浄化槽維持管理 3 業種連携およびオンライン化，環境技術，Vol. 43，No. 9，pp. 15-20，2014
- 4) 芳倉太郎，西尾孝之，福永功，生物学的硝化脱窒法による排水の高度処理，生活衛生，Vol. 43，No. 2，pp. 49-64，1999
- 5) 井出昌樹，武藤暢夫，浄化槽を想定した硝化液循環型脱窒法における循環比等に関する実験的検討 第 1 報-循環比と反応系の酸化還元系レベル，空気調和・衛生工学会論文集，No. 52，pp. 9-16，1993
- 6) 蛭江美孝，山崎宏史，小椋有未永，徐開欽，浄化槽における CH_4 ， N_2O 排出量に及ぼす原水流入変動と嫌気

=好気循環の影響解析，水環境学会誌，Vol. 35，No. 2，pp. 27-32，2012

- 7) 藤村葉子，中島淳，小規模合併処理浄化槽の処理水性状と循環運転による窒素除去，水環境学会誌，Vol. 21，No. 3，pp. 157-162，1998
- 8) 日本工業規格，JIS K 0102 21，2013
- 9) 日本工業規格，JIS K 0102 21 備考 1，2013
- 10) 日本工業規格，JIS K 0102 45. 2，2013
- 11) 日本工業規格，JIS K 0102 46. 3，2013
- 12) 安田正志，三原雄一郎，太田篤志，二瓶正彦，循環式好気汙床法における脱窒反応に及ぼす設計操作条件の影響，水環境学会誌，Vol. 21，No. 9，pp. 569-577，1994
- 13) 嶋津暉之，志村真理，井上互，木村賢史，家庭用合併処理浄化槽の水質向上に関する研究，用水と排水，Vol. 30，pp. 462-470，1988
- 14) 宮本涼一，佐藤八郎，笹川猛，稲森悠平，嫌気・好気循環ろ床法による有機物，窒素の高度処理，公害と対策，Vol. 27，No. 9，pp. 832-836，1991
- 15) 魏永芬，揚琨，魏長潔，安福克人，奥村信哉，玉川貴文，田中仁，梅田昌則，李富生：浄化槽放流水の透視度にかかわる物質に関する考察，環境技術，Vol. 43，No. 9，pp. 21-25，2014

(2016. 5. 26 受付)

EFFECT OF WATER CIRCULATION ON THE TREATED WATER QUALITY OF JOHKASOU - EVALUATION BASED ON MULTIVARIATE ANALYSIS -

Yasushi ISHIGURO, Yenni TRIANDA, Tomonari FUJISAWA, Katsuhito YASUFUKU, Shinya OKUMURA, Takafumi TAMAGAWA, Joni Aldilla FAJRI and Fusheng LI

The effect of water circulation on the treated water quality of Johkasou was evaluated through cluster and principal component analyses of the measurement results for three Johkasou units that had different usage conditions (the ratio of the practical to the designed number of users being 0. 8, 0. 14 and 0. 29, respectively). Water circulation promoted denitrification, leading to decreases in the concentration of total nitrogen in the water after treatment; however, it did not bring about observable changes for the removal of BOD. Cluster and principal component analyses showed that all water quality indices could be classified into two groups relating to the organic loadings and nitrification-nitrification, respectively. Statistically weak correlation revealed between these two groups suggests that water circulation is effective for the removal of nitrogen; however, for the removal of BOD, different approaches are necessary.